



ESTUDIO FÍSICO COMPARATIVO DE PINTURAS COMERCIALES DE ALTA TEMPERATURA PARA APLICACIÓN EN COLECTORES SOLARES

Leidy Mariana Mosquera Rivera

Universidad Tecnológica de Pereira

**Facultad de ingenierías eléctrica, electrónica, física y de sistemas y
computación**

Programa de Ingeniería Física

Pereira

2020



**ESTUDIO FÍSICO COMPARATIVO DE PINTURAS COMERCIALES DE
ALTA TEMPERATURA PARA APLICACIÓN EN COLECTORES
SOLARES.**

Leidy Mariana Mosquera Rivera

Directora

Beatriz Cruz Muñoz

Co- director

Rubén Dorantes Rodríguez

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Física

Universidad Tecnológica de Pereira

**Facultad de ingenierías eléctrica, electrónica, física y de sistemas y
computación**

Programa de Ingeniería Física

Pereira

2020

Dedicatoria

Se llena mi corazón de felicidad al saber que pude alcanzar este gran logro. Agradecida con Dios porque estuvo sosteniéndome en todo momento, a mis padres y hermanito ya que no es un logro solo mío sino de ellos, quienes estuvieron siempre pendientes en mi proceso y brindándome su ayuda, que me apoyaron en los momentos difíciles y también se alegraron por mi avance como profesional. A mi abuelita Elvia por ser mi motivadora por excelencia.

Agradecimientos

Agradecida con Dios por ser el centro de mi vida, porque me dio la sabiduría y perseverancia que necesité a lo largo de mi carrera, le agradezco a mis padres por ser un apoyo incondicional, por todos los sacrificios que hicieron para yo poder continuar con mi carrera, por tan pero tanto amor. A mi hermanito por ser de apoyo y suplirme en tareas extras para yo poder dedicar mi tiempo a la universidad. Le agradezco al Ingeniero Cristian porque me ayudo a superarme y a esforzarme para ser cada día mejor. A mi abuelita y tía Yolly que siempre se sintieron orgullosas con cada paso que daba. De verdad considero que mi alegría esta compartida...

Muy agradecida con Dios por los tutores que me coloco, él conoce la incertidumbre en la que estuve muchos momentos de mi carrera y supo en qué momento encajarlos a ellos y a los chicos de GIMM en mi camino. gracias a ellos pudo surgir mi “espíritu investigativo”.

A la Dra. Beatriz cruz Muñoz gracias por creer en mí y darme su apoyo desde el primer momento que nos conocimos, aprendí mucho de su templanza y dominio a la hora de tomar decisiones importantes. Al Dr. Rubén Dorantes Rodríguez por estar tan pendiente en todo mi proceso de tesis, porque estuvo ahí dándome consejos profesionales y también estuvo dispuesto a brindarme sus sabios consejos de la vida cuando los necesite. Gracias porque ambos fueron fuertes cuando debieron serlo, pero también amables cuando necesite de sus colaboraciones, gracias por su paciencia, de verdad me voy muy agradecida con ambos y con los chicos del laboratorio, conocí gente maravillosa. La ingeniera Laura Bedoya Flórez (Lauris) quien fue como una tutora cuando inicie en el mundo de la investigación, porque siempre estuvo dispuesta a ayudarme y a enseñarme. Al Dr. Jorge Iván Montes quien me llenaba de motivación a la hora de realizar mis ponencias, porque me escucho y me corrigió con mucho aprecio. Al Dr. German Daza porque me ayudo en mi proceso de análisis cuando lo necesite, porque siempre estuvo dispuesto a discutir temas para que yo pudiera aprender más. A Mairon por brindarme su confianza y hacerme pasar ratos agradables en el laboratorio.

Al Dr. José Luis Tristanco Reyes y a la ingeniera María Paulina Holguín Patiño del laboratorio de corrosión de la UTP, por habernos prestado la cámara salina, por el asesoramiento recibido en las pruebas de durabilidad y su energía tan positiva cada vez que requerí ayuda con mis dudas.

Gracias a la convocatoria nacional jóvenes investigadores e innovadores en alianza Sena-Colciencias 2016-2017 por otorgarme la beca para ser joven investigadora y a la ingeniera Diana Marcela Gomez Mejía por brindarme su conocimiento en mi paso por Tecnopaque nodo Pereira.

Gracias a Joan Felipe Gomez Mazuera por acompañarme durante todos estos años, porque me brindo su amistad y tengo la certeza de que será un amigo para toda la vida.

Gracias, gracias a todos y aún aquellos que no menciono aquí con nombre propio pero que también fueron de gran apoyo para mí, los llevo en mi corazón.

INDICE GENERAL

RESUMEN EJECUTIVO	11
CAPITULO 1.....	12
INTRODUCCION.....	12
1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACION	13
1.2. PLANTEAMIENTO DE LA PREGUNTA DE INVESTIGACION	15
1.3. OBJETIVOS	17
1.4. PALABRAS CLAVES.....	17
CAPITULO 2.....	18
ESTADO DEL ARTE	18
CAPITULO 3.....	29
MARCO TEORICO	29
3.1. SISTEMAS DE CAPTACION SOLAR.....	29
3.1.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	29
3.1.2 SISTEMAS TÉRMICOS	29
3.1.2.1. EL COLECTOR SOLAR PLANO	30
3.1.2.2. FUNCIONAMIENTO DE UN COLECTOR SOLAR PLANO.....	32
3.1.2.3. COMPONENTES PRINCIPALES DE UN COLECTOR SOLAR PLANO ...	34
3.2. SUPERFICIES ABSORBEDORAS.....	35
3.2.1. RECUBRIMIENTOS A BASE DE PINTURAS COMERCIALES DE ALTA TEMPERATURA Y TIPO DE SUSTRATOS UTILIZADOS	36
3.2.2. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE LAS PINTURAS DE ALTA TEMPERATURA Y DESCRIPCION DE LA TÉCNICA DE DEPÓSITO UTILIZADA	37
TECNICA DE DEPOSITO	37
MODO DE APLICACIÓN	38
DESCRIPCION TECNICA DE LAS PINTURAS DE ALTA TEMPERATURA	38
3.2.3. COMPORTAMIENTO DE LAS PINTURAS DE ALTA TEMPERATURA ANTE EL INTEMPERISMO Y SU DURABILIDAD	41
3.3. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS SUPERFICIES ABSORBEDORAS 41	
3.3.1. CARACTERIZACION OPTICA.....	41
3.3.1.1. ESPECTROS DE REFLECTIVIDAD Y ABSORTIVIDAD.....	43
3.3.1.2. EMISIVIDAD TERMICA.....	44

3.3.2.	CARACTERIZACION MECANICA.....	46
3.3.2.1.	ESPESOR	46
3.3.2.2.	ADHERENCIA.....	46
3.3.3.	PRUEBAS DE DURABILIDAD.....	48
3.3.3.1.	CÁMARA SALINA	49
3.3.3.2.	INTEMPERISMO NATURAL	50
CAPITULO 4.....		51
PROCESO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS.....		51
4.1.	PREPARACIÓN DE LOS SUSTRATOS.....	51
4.1.1.	PROTOCOLO DE PULIDO	51
4.1.2.	PROTOCOLO DE LIMPIEZA- BAÑO ULTRASÓNICO	52
4.2.	APLICACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS SOBRE LOS SUSTRATOS.....	53
	RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LAS TECNICAS DE CARACTERIZACION ...	54
4.3.	CARACTERIZACION MECANICA SIN PRUEBAS DE DURABILIDAD.....	55
4.3.1.	MEDICIÓN DE ESPESORES	55
4.3.2.	ADHERENCIA.....	56
4.4.	CARACTERIZACION OPTICA SIN PRUEBAS DE DURABILIDAD.....	59
4.4.1.	MEDICIÓN DE LA EMISIVIDAD TÉRMICA	59
4.4.2.	ESPECTROS DE REFLECTIVIDAD Y ABSORTIVIDAD	66
4.5.	PRUEBAS DE DURABILIDAD EN CAMARA SALINA.....	74
4.6.	RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN ÓPTICA Y MECANICA DE LAS MUESTRAS DESPUÉS DE SOMETERSE A PRUEBAS DE DURABILIDAD EN CÁMARA SALINA	80
4.6.1.	ESPECTROS DE ABSORTIVIDAD	80
4.6.2.	EMISIVIDAD TÉRMICA	82
4.6.3.	ADHERENCIA.....	82
4.7.	PRUEBAS DE DURABILIDAD DE INTEMPERISMO NATURAL.....	84
4.8.	APLICACIÓN DE UN DISEÑO MULTICAPA PARA REDUCIR LA EMISIVIDAD TÉRMICA	84
CAPITULO 5.....		89
CONCLUSIONES.....		89
CONSIDERACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.....		90
BIBLIOGRAFÍA.....		91

INDICE FIGURAS

Figura 1. Tipos de combustibles fósiles. Carbono, gas natural, petróleo. [5].....	13
Figura 2. Impacto ambiental del uso de combustibles fósiles. [6]	14
Figura 3. Tipos de energía renovable. Iconos de plantas de energía. solar, eólica, hidráulica, biocombustibles, energía geotérmica, energía de las mareas alternativa renovable. [9]	15
Figura 4. Colector solar plano con vidrio [10].....	16
Figura 5. Panel solar, energía solar fotovoltaica [12]	18
Figura 6. Colector solar, energía solar térmica [14].....	18
Figura 7. Aplicaciones de la energía solar [15]	19
Figura 8. Granja solar en Yumbo, Valle del Cauca. [17].....	21
Figura 9. Sistema de calefacción de agua para apartamentos Hábitat 127 utilizando colectores solares planos [18].	22
Figura 10. Sistema de calentamiento utilizando colectores de polipropileno para calentar una piscina de 90 m ³ de agua, sobre 28°C [18]	23
Figura 11. Sistema de calefacción solar piscina de 55 m ² de agua con colectores de tubos de vidrio al vacío en Villa Leyva Boyacá [18].	23
Figura 12. Sistema de calefacción solar para climatizar el agua de las piscinas de formación y competencia en la UTP [19].....	24
Figura 13. Tecnología solar térmica recubrimiento TINOX [24].	26
Figura 14. Recubrimiento TiNox de 95mm de espesor en un colector solar de placa plana.[21].....	27
Figura 15. Componentes eléctricos básicos de un sistema fotovoltaico. [31]	29
Figura 16. Tipos básicos de colectores solares de placa plana, en función de la configuración del absorbedor. (A) Tipo parrilla y (B) Tipo serpentín [34]	31
Figura 17. (A) Colector solar sin cubierta. (B) Colector solar plano con cubierta [35].....	31
Figura 18. Espectro electromagnético de la radiación solar. [37]	32
Figura 19. Energía radiada por el Sol y la tierra [37].....	33
Figura 20. Colector solar plano con cubierta de vidrio y sus componentes [38]	34
Figura 21. Placa absorbidora sobre aleta de cobre [39].....	35
Figura 22. Dos tipos de pinturas de altas temperaturas utilizadas como absorbedores solares. (A) Marca Pituco [40]. (B) Marca Rust Oleum [41].	36
Figura 23. Tipos de sustratos metálicos empleados (A) Acero inoxidable 304. (B) Cobre. (C) Aluminio .	37
Figura 24. Esquema de un aerosol y sus componentes [42].....	38
Figura 25. Espectrofotómetro UV-Visible Evolution™ 201/220	43
Figura 26. Montaje experimental para medir la emisividad.	45
Figura 27. Equipos para la medición de espesores. (A) positector modelo 6000, DeFelsko. (B) medidor de espesor marca CEM, DT-156.....	46
Figura 28. Cinta Elcometer 99 utilizada conformemente al estándar ASTM D3359 – el método de corte de trama cruzada para medir la adherencia utilizando la prueba con la cinta [55].....	47
Figura 29. Corte rayado formando un enrejado de 2 mm de separación.	47
Figura 30. Aplicación de la cinta elcometer sobre el rayado del recubrimiento.....	47
Figura 31. Cámara salina del laboratorio de corrosión en la Universidad Tecnológica de Pereira.	50
Figura 32. Caja para pruebas de intemperismo natural	50

Figura 33. Sustratos metálicos antes (izquierda) y después (derecha) del proceso de lijado. (A)Aluminio. (B)Cobre. (C)Acero inoxidable.	51
Figura 34. Proceso experimental de lijado de sustratos metálicos	52
Figura 35. Proceso experimental de la limpieza de sustratos en baño ultrasónico	52
Figura 36. Sustratos listos para depositar	53
Figura 37. Pintura Pintuco de alta temperatura y pintura Rust Oleum de altas temperaturas depositadas sobre sustratos de aluminio, acero inoxidable 304 y cobre.	53
Figura 38. Medición de espesor con el positector CEM DT-156.....	55
Figura 39. Corte en enrejado haciendo uso de un bisturi de punta fina	56
Figura 40. Trozo de cinta elcometer despues de realizar el desprendimiento	56
Figura 41. Cinta elcometer sobre el corte enrejado.....	56
Figura 42. Desprendimiento de la cinta elcometer a un ángulo de 180°	56
Figura 43. Montaje muestras sobre placa calefactora	60
Figura 44. Aplicación el negro de humo como material de referencia.....	60
Figura 45. Iniciación Cámara termográfica	61
Figura 46. Método de acceso a menú principal cámara termográfica	61
Figura 47. parámetros de configuración cámara termográfica	62
Figura 48. Ajuste rango de temperatura.....	62
Figura 49. Ajuste valor de emisividad de referencia.....	63
Figura 50. Ajuste temperatura de segundo plano.....	63
Figura 51. (A) Ajuste marcadores utilizados. (B)Colocación marcador sobre la superficie de humo negro	64
Figura 52. medición de la temperatura ya estabilizada en el negro de humo	65
Figura 53. Variación ajuste de la emisividad para encontrar el mismo valor de temperatura hallado en el negro de humo.....	65
Figura 54. Montaje experimental medición de emisividad	65
Figura 55. selección método de esfera integradora y barrido.....	67
Figura 56. Configuración del instrumento.....	68
Figura 57. Accesorio ISA-220 con configuración para reflectancia	68
Figura 58. Instalación en la parte derecha del Accesorio ISA-220	68
Figura 59. Calibración del instrumento. (A) Manera de medir la línea base. (B) Material reflectivo llamado spectralon.	69
Figura 60. Medición e identificación de las muestras	69
Figura 61. Espectro de reflectividad y absortividad de la muestra PAL03 (Pintuco depositado sobre aluminio lijado 03)	70
Figura 62. Espectro de reflectividad y absortividad de la muestra PAIL03 (Pintuco depositado sobre acero inoxidable 304 lijado 03).....	70
Figura 63. Espectro de reflectividad y absortividad de la muestra RAL03 (Rust Oleum depositado sobre aluminio lijado 03)	70
Figura 64. Espectro de reflectividad y absortividad de la muestra RAIL03 (Rust Oleum depositado sobre acero inoxidable 304 lijado 03)	71
Figura 65. Espectro de reflectividad y absortividad de la muestra RCL03 (Rust Oleum depositado sobre cobre lijado 03)	71
Figura 66. Comparación espectros de reflectividad de pinturas comerciales de alta temperatura depositadas sobre sustratos metálicos	72

Figura 67. Comparación espectros de absorptividad de pinturas comerciales de alta temperatura depositadas sobre sustratos metálicos	72
Figura 68. Preparación de las muestras depositadas sobre aluminio para ingreso a cámara salina	75
Figura 69. Preparación de las muestras depositadas sobre acero inoxidable 304 para ingreso a cámara salina	75
Figura 70. Posición de las muestras durante la exposición a cámara salina a un ángulo de 15° a 30° del plano vertical	75
Figura 71. Muestras de pinturas depositadas sobre sustratos metálicos antes y después de ser sometidas a pruebas de durabilidad en cámara salina.	77
Figura 72. Comparación visual grado y tipo de distribución de oxidación.	79
Figura 73. Comparación espectros de absorptividad de la muestra PAL03, en A antes y en B, después de ser sometida a cámara salina.	80
Figura 74. Comparación espectros de absorptividad de la muestra PAIL03, en A antes y en B después de ser sometida a cámara salina	80
Figura 75. Comparación espectros de absorptividad de la muestra RAL03, en A antes y en B después de ser sometida a cámara salina	81
Figura 76. Comparación espectros de absorptividad de la muestra RAIL03, en A antes y en B después de ser sometida a cámara salina	81
Figura 77. Muestras sometidas a Intemperismo natural en la ciudad de Pereira	84
Figura 78. Recubrimientos depositados por el método de inmersión (sol gel). (A)EXP1.2.5 (B)EXP3.2.4 (C)EXP5.2.6 (D)EXP6.2.4	86
Figura 79, Recubrimientos multicapas. (A)EXP1.2.5_RustOleum (B)EXP3.2.4_RustOleum (C)EXP5.2.6_RustOleum (D)EXP6.2.4_RustOleum	86
Figura 80. Espectros de absorptividad muestras depositadas en multicapas	88

INDICE TABLAS

Tabla 1. Aplicaciones de la energía térmica y fotovoltaica [15].....	19
Tabla 2. Especificaciones técnicas de la pintura en aerosol para altas temperatura de marca Pintuco [44]	39
Tabla 3. Especificaciones técnicas de la pintura en aerosol para altas temperatura de marca Rust Oleum [45] [46].....	40
Tabla 4. Clasificación de los resultados de la prueba de adhesión conforme a la norma ASTM D3359-09 por el método B [55]	47
Tabla 5. Parámetros de funcionamiento de la cámara salina de la UTP.....	49
Tabla 6. Nomenclatura de las muestras depositadas sobre sustratos metálicos.....	54
Tabla 7. Valor promedio de espesores de las muestras sometidas a pruebas de adherencia	55
Tabla 8. Clasificación de los resultados de adhesión norma ASTM D3359	57
Tabla 9. Resultados de la prueba de adherencia para las muestras de Pintuco y Rust Oleum sobre sustratos de cobre, aluminio y acero inoxidable 304.	58
Tabla 10. Valor de emisividad térmica tomada para todos los recubrimientos	66
Tabla 11. Especificaciones Espectrofotómetro UV-Visible Evolution™ 220 [61].....	67
Tabla 12. Porcentajes de absorptividad de las pinturas comerciales de alta temperatura depositadas sobre aluminio, cobre y acero inoxidable 304 en el espectro electromagnético.	71
Tabla 13. Comportamiento óptico de los recubrimientos depositados. Medición de la selectividad.	73
Tabla 14. Valor promedio de espesores de las muestras sometidas a cámara salina	74
Tabla 15. Parámetros de funcionamiento cámara salina de la UTP	76
Tabla 16. Grado y tipo de distribución de óxido, según la norma ASTM D610-08 [60]	78
Tabla 17. Comparación valores del porcentaje de absorptividad en el espectro electromagnético	81
Tabla 18. Valor de emisividad térmica tomada para todos los recubrimientos antes y después de ser sometidas a cámara salina	82
Tabla 19. Resultados y comparación de las pruebas de adherencia antes y después de someter las muestras a cámara salina	83
Tabla 20. Descripción de las muestras depositadas por el método de sol gel	85
Tabla 21. Valores medición de emisividad muestras depositadas por el método sol-gel	87
Tabla 22. Valores del porcentaje de absorptividad de las muestras depositadas en multicapas en el espectro electromagnético	88
Tabla 23. Valores medición de la emisividad de las muestras depositadas en multicapas	88

RESUMEN EJECUTIVO

Este trabajo de investigación tuvo como propósito buscar una posible solución y un mejoramiento de un colector solar plano por medio pinturas comerciales de alta temperatura que se encuentran en el mercado colombiano, con el fin de utilizarlas como posible capa absorbedora, ya que la función de esta capa es absorber la radiación solar de onda corta y transferir el calor al fluido que está circulando por el colector solar. Se utilizaron dos tipos de pintura, la primera es de una marca colombiana llamada Pintuco que soporta temperaturas de hasta 350 °C y la segunda, es de una marca estadounidense llama Rust Oleum que soporta hasta 650°C. Ambas pinturas fueron depositadas sobre sustratos de aluminio, cobre y acero inoxidable 304 con el fin de realizar una comparación de sus propiedades físicas. Las muestras depositadas se sometieron a un estudio de caracterización óptica, mecánica y de durabilidad.

Para la caracterización óptica se realizaron mediciones de su emisividad térmica, que se basó en la norma ASTM 1933-99 y en la que se hizo uso de una cámara termográfica. La otra medición fue el porcentaje de absorptividad que se midió por medio de un espectrofotómetro UV-VIS. Para la caracterización mecánica se realizaron mediciones de espesores con un positector y se realizaron pruebas de adherencia basados en la norma ASTM D3359, en la que se hizo uso de la cinta Elcometer. Los ensayos de durabilidad en cámara salina se rigieron basados en la norma NTC1156 y se realizaron con el fin de conocer el comportamiento de las pinturas sobre los sustratos, ante la presencia de un ambiente de tipo salino o costero, y de esa manera medir el tiempo en que el recubrimiento mantiene una estabilidad de las propiedades medidas. Después de esta prueba en cámara salina, se realizó de nuevo la caracterización óptica y mecánica de las muestras analizadas.

Como principales resultados obtenidos se tuvo que, tanto la pintura Pintuco como la pintura Rust Oleum, presentaron altos porcentaje de absorptividad superiores al 95%, pero también presentaron una emisividad térmica muy alta, con un valor promedio de 0,99. Se obtuvieron espesores menores a 50 μm y la pintura Rust Oleum presentó una excelente adherencia en los sustratos de aluminio y acero inoxidable 304, sin embargo la pintura Pintuco depositada sobre cobre presentó un desprendimiento mayor a 65%, es decir no tuvo una buena adherencia. Después de someter las muestras a cámara salina no se tuvo un ataque corrosivo alto, sin embargo, la pintura Pintuco depositada sobre acero inoxidable 304 presentó pequeños desprendimientos sobre la superficie. La pintura Rust Oleum siguió presentando una excelente adherencia en los sustratos de aluminio y acero inoxidable 304 después de la exposición. Finalmente, y con el propósito de reducir la alta emisividad térmica de las pinturas, se realizó una prueba de diseño multicapa, donde se depositó sobre un sustrato de acero inoxidable cuatro muestras de diferentes composiciones y emisividades térmicas menores a 0,2 depositadas por el método de inmersión sol-gel y encima una capa de pintura Rust Oleum. Los resultados ópticos mostraron un porcentaje de absorptividad mayor a 95% y una emisividad térmica promedio de 0.99, lo cual indica que este arreglo no mostró mejoría alguna en su emisividad térmica, con relación al uso solamente de una capa de pintura, aunque mantuvo valores altos de absorptividad.

CAPITULO 1

INTRODUCCION

Un calentador o colector solar es un dispositivo que se encarga de coleccionar energía proveniente del sol y a través de este proceso, eleva la temperatura para calentar algún tipo de fluido, en nuestro caso, calentar agua. La captación de la irradiación solar se puede clasificar en calentamiento solar de baja temperatura (30 a 90°C), media temperatura (91 a 350°C), y alta temperatura (351 a 1500°C). Tener buenas propiedades ópticas en colectores solares planos es un factor importante en la eficiencia de conversión térmica de la irradiación solar. En la literatura y tesis anteriores a este trabajo [1] [2] se puede encontrar diferentes recubrimientos del colector solar que ayudan a que estas propiedades ópticas mejoren y optimicen aún más el trabajo que realiza el calentador solar, por ejemplo, por medio de capas absorbedoras con una buena selectividad, es decir, alta absorción en longitud de onda corta y baja emisividad térmica en la longitud de onda larga.

La energía, evidentemente, es el pilar del desarrollo de los procesos productivos, del progreso social de los países y elemento fundamental del avance tecnológico mundial y lograr su amplia disponibilidad en la sociedad es un factor importante de calidad de vida para los seres humanos, ya sea a través del uso de la energía para calentamiento, para disponer de energía eléctrica o para producir combustibles. Es así como los proyectos de generación en el sistema eléctrico en Colombia no solo impulsan el desarrollo sostenible, es decir, el aprovechamiento de las fuentes de energía renovable, aprovechando las ventajas que geográficamente abundan en Colombia, sino que también benefician la población que carece de estos servicios, como son las zonas no interconectadas (zonas rurales) [3]. Sin embargo, también es de destacar que estas zonas también tienen problemas en el uso de equipos para secado de productos agrícolas, potabilización y desalinización de agua e inclusive en la falta de disponibilidad de combustibles para la cocción de alimentos, los cuales pueden ser resueltos con el uso de la energía solar y otras fuentes renovables.

En esta investigación, se comparan dos tipos de pinturas comerciales de altas temperaturas utilizadas como capa absorbente en el colector solar, ya que por sus características y color (negro mate) presentan una alta absorción en el espectro visible (400 nm hasta 700 nm) y una parte del espectro de infrarrojo desde 701 hasta 2500 nm. Ambas pinturas se depositarán sobre sustratos de aluminio, cobre y acero inoxidable 304 con el fin de hacer una comparación en las pruebas de caracterización óptica, mecánica y durabilidad.

Este trabajo se desglosa de la siguiente manera: El capítulo 1 contiene la introducción, el problema de investigación, el planteamiento de la pregunta de investigación, los objetivos planteados para el desarrollo de esta investigación y palabras claves; en el capítulo 2 se presenta el estado del arte (uso de la energía solar, aplicaciones, equipos de captación solar y antecedentes bibliográficos de tesis y artículos). En el capítulo 3 se presenta el marco teórico de los colectores solares planos, la superficie absorbente, descripción técnica de las pinturas comerciales de alta temperatura y técnicas de caracterización de las superficies absorbentes. En el capítulo 4 se presenta el proceso experimental y los resultados obtenidos (recubrimientos utilizados, tipo de sustratos, técnicas de

caracterización y comparación de los resultados obtenidos con los tipos de pintura y los sustratos empleados). En el capítulo 5 se presentan las conclusiones de este trabajo y para finalizar, en el capítulo 6 se presentan los anexos de las normas empleadas, publicaciones y eventos asistidos.

1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACION

Los combustibles fósiles (Figura 1) comprenden el 80% de la demanda actual de energía primaria a nivel mundial y los sistemas energéticos son la fuente de aproximadamente dos tercios de las emisiones globales de CO₂ a nivel mundial. En vista de que se cree que las emisiones de metano y otros contaminantes climáticos de corta vida están muy subestimadas, es probable que la producción y el uso de energía sean la fuente de una proporción de emisiones incluso mayor [4]. Asimismo, gran parte de los combustibles de biomasa se usan actualmente para calefacción y cocina a pequeña escala en todo el mundo. Estos combustibles son extremadamente ineficientes y contaminantes, sobre todo en lo que respecta a la calidad del aire interior en muchos países menos adelantados.



Figura 1. Tipos de combustibles fósiles. Carbono, gas natural, petróleo. [5]

Si continúan las tendencias actuales, o, dicho de otra manera, si la proporción actual de combustibles fósiles se mantiene y la demanda energética casi se duplica para 2050, las emisiones superarán enormemente la cantidad de carbono que se puede emitir si se ha de limitar el aumento medio de temperatura a nivel mundial a 2 °C. El nivel de emisiones tendría consecuencias climáticas desastrosas para el planeta. Entre las posibilidades con las que cuenta el sector energético para reducir las emisiones cabe destacar, sobre todo, la disminución de la cantidad de energía consumida y de la intensidad carbónica neta del sector energético al cambiar y controlar las emisiones de CO₂ [4].

Es necesario entonces entrar en una etapa de transición energética, modificar nuestros patrones de consumo si queremos llegar al objetivo de reducir drásticamente las emisiones de CO₂ (Figura 2) y hacer un entorno más sostenible con el medio ambiente. Una de las principales soluciones que se presenta para reducir las emisiones de los gases contaminantes es implementar en forma masiva en Colombia el uso de las energías renovables, como la energía solar, la energía eólica, entre otras, ya que la energía hidráulica si se emplea en forma masiva, así como la energía de la biomasa.



Figura 2. Impacto ambiental del uso de combustibles fósiles. [6]

Las energías renovables son recursos limpios e inagotables que proporciona la naturaleza. Estas energías, a diferencia de los combustibles fósiles, no producen gases de efecto invernadero ni emisiones contaminantes en forma directa, por lo que afectan de manera reducida al cambio climático y brindan una solución limpia que evita la degradación ambiental [7].

Las fuentes de energía renovable son recursos energéticos naturales capaces de renovarse ilimitadamente y tienen un bajo impacto de contaminación ambiental, por lo tanto, los procesos para transformarlas en energía térmica o eléctrica no necesitan de combustibles fósiles, aunque si lo necesitan los materiales empleados para producir estas tecnologías. Este tipo de energías tienen grandes ventajas como ayudar a potenciar el autoconsumo, son beneficiosas para el medio ambiente, son recursos naturales gratuitos e inagotables y son un plus para lograr la independencia energética de un hogar, de una comunidad o inclusive de una empresa. En la naturaleza podemos encontrar variedad de fuentes renovables de las que se puede extraer energía útil para transformarla en energía térmica, mecánica o energía eléctrica. Entre ellas, se encuentra la energía solar que es aquella que obtenemos del sol. A través de placas solares se absorbe la irradiación solar y se transforma en calor, movimiento o electricidad que pueden ser almacenadas o en el caso de la energía eléctrica, entregada a la red eléctrica. Similar a ella, existe la energía solar termoeléctrica,

que es aquella que utiliza la irradiación solar para calentar un fluido (que puede ser agua), transformarla en vapor y luego en ciclo termodinámico para producir energía eléctrica. También se puede encontrar otros tipos de energías renovables (Figura 3) como son la energía eólica, la energía hidroeléctrica, la biomasa, la energía geotérmica y la energía oceánica [8].



Figura 3. Tipos de energía renovable. Iconos de plantas de energía. solar, eólica, hidráulica, biocombustibles, energía geotérmica, energía de las mareas alternativa renovable. [9]

1.2. PLANTEAMIENTO DE LA PREGUNTA DE INVESTIGACION

La energía solar térmica procede de una fuente gratuita e inagotable como lo es el sol, y permite reducir la emisión de gases productores del efecto invernadero, sustituyendo el uso de combustibles fósiles causantes del calentamiento global, y además puede aportar valor añadido a una vivienda, elimina la dependencia de las constantes subidas del gas y la electricidad, entre otras ventajas. La energía solar se recolecta a través de colectores solares de diversos tipos. Un colector térmico de placa plana es un dispositivo simple para calentar agua, aire o cualquier fluido, tiene una superficie grande y plana (absorbente) para maximizar la exposición al sol, y tiene pequeños tubos unidos a ella (Figura 4). El fluido corre a través de los tubos, recogiendo el calor del absorbente. Los lados y el fondo del colector están bien aislados, y el vidrio en la parte superior permite crear un efecto invernadero dentro del colector. El recubrimiento de la placa de absorción, llamada también capa absorbente, la cual está hecha principalmente de óxidos metálicos, afecta directamente la eficiencia térmica del colector.



Figura 4. Colector solar plano con vidrio [10]

Los parámetros más importantes a la hora de calificar la capa absorbadora de un colector solar plano son la absorptancia y la emitancia; es decir, se debe cuantificar cuanto absorbe y cuanto emite. Existen diferentes tipos de recubrimientos que presentan buenas propiedades ópticas (alta absorptancia y baja emitancia), sin embargo, es de gran importancia la durabilidad de los recubrimientos, debido a que, en un estado inicial, los recubrimientos pueden tener muy buenas propiedades ópticas, pero al someterlas a pruebas aceleradas de durabilidad (Intemperismo, cámara salina, entre otras), estas propiedades pueden variar drásticamente, y también puede variar la adherencia y la dureza del recubrimiento. Con base en este inconveniente, se plantea el desarrollo de este proyecto, con el fin estudiar el comportamiento de pinturas comerciales que soportan temperaturas alrededor 300 °C, que puedan ser empleadas como recubrimientos de la capa absorbadora con características ópticas y mecánicas adecuadas (alta absorptividad, baja emisividad, buena adherencia y resistencia a la intemperie, etc.) para ser utilizados como absorbadores solares en colectores planos. Por lo que se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Las pinturas comerciales resistentes a altas temperaturas, son factibles de ser utilizadas como absorbadores en colectores solares planos para mejorar sus propiedades selectivas (alta absorptividad y baja emisividad), así como su estabilidad térmica?

Para responder a esta pregunta, se han planteado los siguientes objetivos, general y específicos.

1.3. OBJETIVOS

Objetivo general

- ❖ Fabricar y caracterizar dos pinturas comerciales de alta temperatura depositadas sobre sustratos metálicos con el fin de ser utilizados como absorbedores en colectores solares de baja y de media temperatura.

Objetivos específicos

- ❖ Realizar una selección de los tipos de pinturas de alta temperatura disponibles en el mercado colombiano, para su uso en la construcción de absorbedores solares.
- ❖ Fabricar un conjunto de muestras de este tipo de recubrimiento sobre sustratos de cobre, aluminio y principalmente sobre acero inoxidable 304.
- ❖ Caracterizar óptica y mecánicamente cada uno de los recubrimientos depositados, midiendo la absorptividad, la emisividad térmica, grosor, dureza y adherencia de cada uno de los recubrimientos y realizar una evaluación comparativa.
- ❖ Caracterizar óptica y mecánicamente los recubrimientos sometidos a prueba de durabilidad en la cámara salina y en Intemperismo natural y realizar una evaluación comparativa.

1.4. PALABRAS CLAVES

Capa absorbedora, colector solar, eficiencia térmica, emisividad térmica, energía solar.

CAPITULO 2

ESTADO DEL ARTE

La energía solar goza de numerosos beneficios que la sitúan como una de las más prometedoras. Es renovable, inagotable, no contaminante, evita el calentamiento global, reduce el uso de combustibles fósiles, reduce las importaciones energéticas, genera riqueza y empleo local ya que su implantación en un país disminuye la dependencia energética de otros países; contribuye al desarrollo sostenible, es modular y versátil. [11]

Existen varias maneras de recoger y aprovechar los rayos del sol para generar energía que dan lugar a los **distintos tipos de energía solar**: la tecnología fotovoltaica y la energía solar térmica o energía termo solar.



Figura 5. Panel solar, energía solar fotovoltaica [12]

Energía solar fotovoltaica: Consiste en transformar directamente la luz o radiación solar en electricidad. Se encarga de transformar fotones en electricidad (electrones) por medio del efecto fotoeléctrico y mediante el uso de los paneles solares fotovoltaicos (Figura 5), para ello se emplea unos dispositivos llamados células fotovoltaicas, que son semiconductores sensibles a la luz [13].



Figura 6. Colector solar, energía solar térmica [14]

Energía solar térmica: Se aprovecha la energía del sol para el consumo doméstico o para producir energía. También se utiliza para alimentar máquinas de refrigeración por absorción, que, en lugar de emplear electricidad para producir frío, emplea calor. La irradiación se recopila con captadores solares (también conocidos como colectores solares) (Figura 6), encargados de coger la radiación solar y convertirla en energía térmica (calor), este calor es utilizado para calentar agua o cualquier líquido en especial. [13]

Una vez ocurre la conversión de energía solar en energía térmica o fotovoltaica, logra cumplir con muchas aplicaciones para la industria y también se puede aplicar en los hogares y en el sector de

los servicios. Algunos de los usos más comunes de la energía solar se encuentran en la tabla 1 y en la figura 7 se encuentran ilustradas algunas aplicaciones de la energía solar:

ENERGIA TERMICA	ENERGIA FOTOVOLTAICA
<ul style="list-style-type: none"> - Calentar el agua de una piscina - Calentar el agua de las duchas o para lavar los platos - Cocción de alimentos - Secadores de productos agrícolas - Uso industrial (hornos solares) - Funcionamiento de máquinas de refrigeración - Desalinización mediante energía solar 	<ul style="list-style-type: none"> - Cargadores solares para teléfonos móviles - Cargadores solares para vehículos - Sistemas de bombeo - Electricidad para viviendas alejadas de la red eléctrica - Alumbrado público - Semáforos - Drones

Tabla 1. Aplicaciones de la energía térmica y fotovoltaica [15]

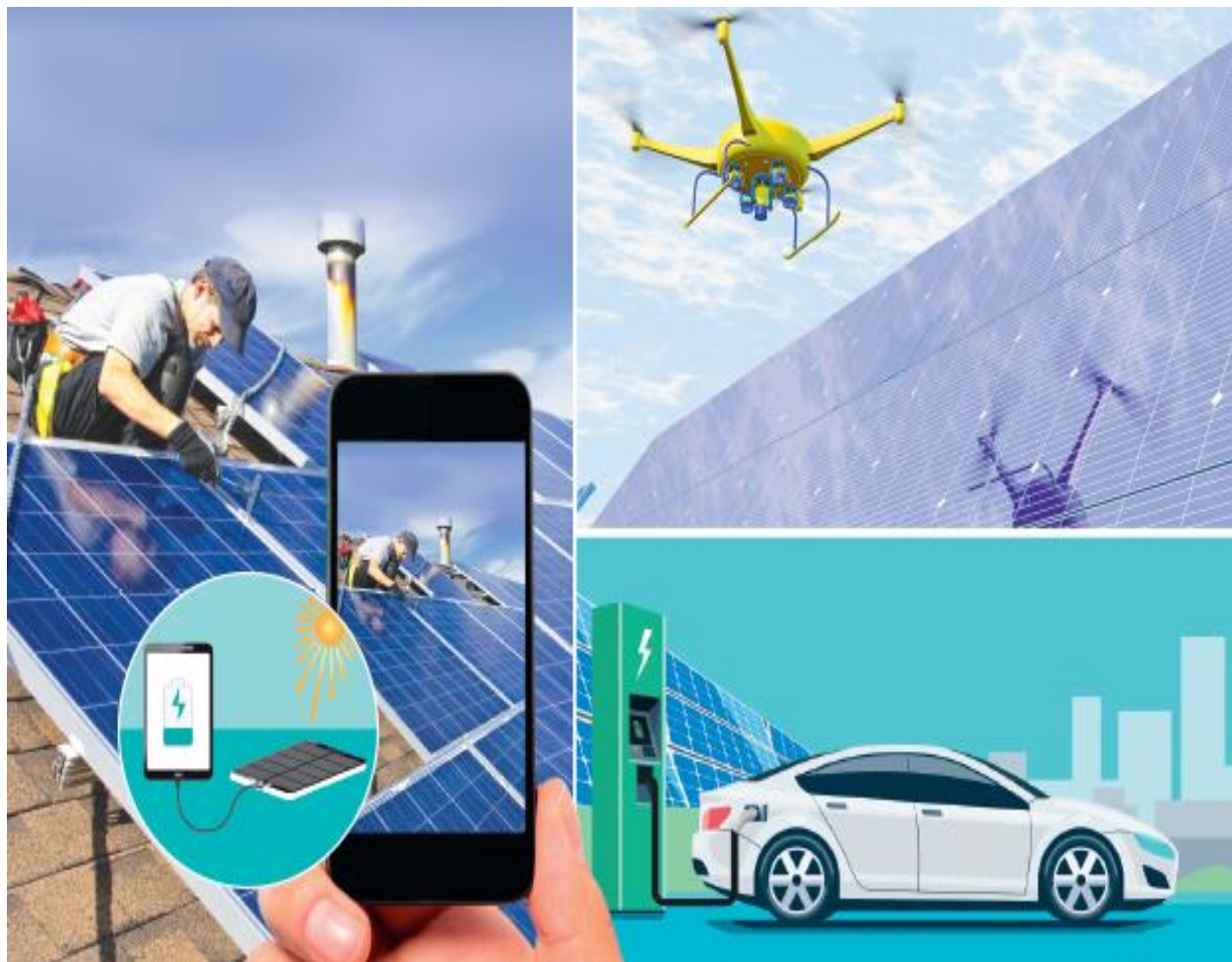


Figura 7. Aplicaciones de la energía solar [15]

En Colombia, el uso de la energía solar se ha convertido en una alternativa que cada vez tiene más adeptos, sobre todo para generar electricidad. La ubicación geográfica privilegiada para la

irradiación energética, el desarrollo de nuevas tecnologías, el auge de nuevos mercados de energías renovables no convencionales y los beneficios tributarios de la Ley 1715 del 2014, han generado un entorno ideal para el desarrollo de pequeños y grandes proyectos basados en este tipo de energía, que convierten al país en un referente de desarrollo de energías renovables [16].

La UPME (Unidad de Planeación Minero-Energética) y el Ministerio de Minas y Energía estiman que para antes de 2030 cerca de 10% del consumo energético en Colombia va a provenir de proyectos fotovoltaicos o solares.

Existen diferentes beneficios de la energía solar en Colombia, entre estos están:

- ❖ La posición geográfica de Colombia, cercana al Ecuador, beneficia la captación de energía solar.
- ❖ En Colombia no se necesita ningún permiso para instalar paneles solares.
- ❖ Permite cumplir con la Resolución 0549 de 2015 del Ministerio de Vivienda que obliga a los constructores a cumplir los parámetros de construcción sostenible para el ahorro de energía y agua.
- ❖ Genera beneficios económicos a largo plazo.
- ❖ Beneficios tributarios e incentivos por parte del Estado por el uso de energía solar, establecidos en la Ley 1715 del 2014.
- ❖ Ciudades como Santa Marta, Barranquilla y Cartagena que tienen altas temperaturas, producen en ocasiones sobrecargas en las redes eléctricas.
- ❖ Llevar electricidad a zonas remotas y de difícil acceso donde no existe red eléctrica.
- ❖ Llevar servicios de salud y educación donde antes no era posible.
- ❖ Generar nuevas oportunidades de empleo a partir de energías limpias.
- ❖ Un sistema de paneles solares aporta al mejoramiento del servicio energético y a la reducción de la huella de carbono en el país.
- ❖ Una alternativa para la electrificación de fincas de recreo y productoras y casas de campo.
- ❖ Ayuda a evitar la emisión de gases contaminantes como CO₂, a la vez que se aporta al compromiso que tiene el país en el Acuerdo de París, de reducir el 20% de sus emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) para el año 2030 bajo la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), según el Ministerio de Medio Ambiente. [16]

Colombia es un referente del uso de energía solar debido a los múltiples usos y las diferentes soluciones que ha desarrollado a partir de este tipo de energía renovable; algunas de sus aplicaciones son:

■ **Las granjas solares** generan grandes cantidades de energía eléctrica limpia que se transporta a través de la red convencional y contribuyen a disminuir los impactos en el medio ambiente. En el municipio de Yumbo en el Valle del Cauca, por ejemplo, se construyó la primera granja solar a

gran escala de Colombia (Figura 8), conectada al Sistema Interconectado Nacional (SIN). Su construcción, que cuenta con 35.000 módulos fotovoltaicos instalados y 9 inversores que transforman la energía continua en energía alterna, marcó un hito en la historia de la electricidad en nuestro país.

Evitará la emisión de 160 mil toneladas de CO₂ durante 25 años. Su capacidad de generación se asemeja al consumo o demanda promedio de 8.000 familias. El área en la que se construyó es de 18 hectáreas, que equivale a 16 canchas de fútbol profesional [16].



Figura 8. Granja solar en Yumbo, Valle del Cauca. [17]

■ **El techo de energía solar más grande de Antioquia en la Fábrica Rionegro de la Compañía Nacional de Chocolates, filial de Grupo Nutresa.** El sistema fotovoltaico, que cuenta con 8.000 módulos y 74 conversores, tiene capacidad para generar 2.132 kWp y atenderá la demanda del 15% del consumo de energía eléctrica de la fábrica. En consecuencia, con la prioridad estratégica de sostenibilidad de la compañía, de reducir el impacto ambiental, con este nuevo sistema se dejarán de emitir 604 toneladas de CO₂, lo que equivale a sembrar al año un bosque de 40 hectáreas.

■ **El piso solar para autogeneración en el Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT,** es el primero instalado en Colombia. Comprende 2.820 módulos solares fotovoltaicos que equivalen a una generación de 902 kWpico, aportándole una reducción del 12% a la tarifa de

energía convencional -\$50 millones al año- y la posibilidad de no emitir 496 toneladas anuales de CO₂.

- La instalación de 1.546 módulos solares en La Universidad Autónoma de Occidente de Cali, que tienen una capacidad de generación de 402 kWp (kilovatio pico) de energía verde para atender el 14,8% de su demanda energética.

- La instalación de 96 módulos solares en el techo del centro comercial La Reserva en Envigado, Antioquia, ayudan a producir más de 43.700 KWh al año y a reducir en 16 toneladas sus emisiones anuales de CO₂ [16].

■ **Calefacción de agua con energía solar para todos los apartamentos de Hábitat 127 - Bogotá.**

Se utilizaron 20 colectores de placa plana para calentar 5000 litros de agua sanitaria al día para suministrar agua a 22 apartamentos de estrato 6 (Figura 9). El sistema incluye como sistema de respaldo dos calentadores de paso industriales de última tecnología, marca BOSCH therm8000 [18].



Figura 9. Sistema de calefacción de agua para apartamentos Hábitat 127 utilizando colectores solares planos [18].

- **Calefacción de agua con energía solar piscina en la Vega Cundinamarca.** Se utilizaron 18 colectores de polipropileno para calentar el agua de una piscina de 90 m³ de agua, sobre 28 °C (Figura 10). [18]



Figura 10. Sistema de calentamiento utilizando colectores de polipropileno para calentar una piscina de 90 m³ de agua, sobre 28°C [18]

■Calefacción solar piscina de 55 m² de agua con tubos de vidrio al vacío en Villa Leyva Boyacá. Se utilizaron 10 colectores solares de 20 tubos al vacío cada uno, tipo mariposa para calentar el agua de la piscina de un Hotel, con capacidad de 50.000 litros de agua a 30 °C (Figura 11) [18].



Figura 11. Sistema de calefacción solar piscina de 55 m² de agua con colectores de tubos de vidrio al vacío en Villa Leyva Boyacá [18].

■Sistema de calefacción solar para climatizar el agua de las piscinas de formación y competencia en la universidad tecnológica de Pereira. El proceso de climatización utiliza absorbedores solares, en un área de cubierta de 332 m^2 , mediante un proceso de conversión de radiación solar en energía térmica. Para el proceso de incorporación de calor a las piscinas, con un volumen de 1.410 m^3 de agua, se utilizan 72 absorbedores solares, con una potencia instalada de $232\text{ kW}_{\text{térmico}}$ convertida y provenientes totalmente de energía solar, generando un aproximado de energía térmica por año de $343.504\text{ kWh}_{\text{t}}$ (kiloWattthora térmico), equivalente a una emisión evitada de 89.372 kg de CO_2 (Figura 12) .

Mediante un proceso de circulación del agua se adiciona energía térmica en un promedio de 1.680 kWh por día, logrando un equilibrio térmico para mantener la temperatura del agua y lograr un confort para los usuarios de las instalaciones.



Figura 12. Sistema de calefacción solar para climatizar el agua de las piscinas de formación y competencia en la UTP [19]

Existen diferentes tipos de celdas y captadores solares para la obtención de la energía solar; para la energía solar fotovoltaica se tiene celdas solares amorfas, policristalinas y monocristalinas [20],

para la energía solar térmica se tiene 4 tipos de colectores: de placa plana con cubierta; concentradores parabólicos; de placa plana sin cubierta y de tubos de vacío. Cada colector solar contiene una superficie absorbadora, que puede ser un recubrimiento a base de pinturas selectivas, o películas delgadas depositadas por un método físico o químico a base de metales. Lo que se busca con esta superficie es que el colector solar contenga buenas propiedades ópticas (alta absorptividad y baja emisividad) es decir, que absorba la mayor cantidad de irradiación solar de onda corta y que emita solo una pequeña fracción infrarroja del espectro en onda larga, y teniendo estas dos características, es posible aumentar la eficiencia térmica de los colectores solares.

Es por esto, que se presentan los siguientes antecedentes que se han centrado en encontrar una capa o superficie absorbadora que cuente con buenas propiedades ópticas para mejorar la eficiencia en el colector solar, que sean duraderos y económicos.

Hay al menos, dos pinturas comerciales con selectividad espectral y sensibles al espesor. Estas pinturas se comercializan bajo las marcas registradas Solarect-Z y SolkoteHI/SORB-II. La pintura Solkote contiene un aglutinante de polímero de silicona y dependiendo del sustrato y del espesor del recubrimiento, una absorción solar de 0,88 a 0,94 y una emisión térmica de 0,28 a 0,49 pueden ser obtenidos. La pintura Solarect-Z se desarrolló en el Instituto National de Química en Ljubljana, Eslovenia y contiene un pigmento de FeMnCuOx en una resina de siloxano y tiene una absorción solar en el rango de 0.90 a 0.92 y una emitancia térmica entre 0.20 y 0.25 para un recubrimiento de 2 a 3 μm de espesor en aluminio. Estudios realizados en un laboratorio de una gama de los pigmentos para un pigmento de acero-manganeso de óxido de cobre (FeMnCuOx) con un aglutinante de silicona, registro una absorción solar 0.92 y una emitancia térmica de 0.13 [21].

Existen varios métodos para fabricar un absorbedor solar selectivo para colectores solares térmicos, como los recubrimientos de oxinitruro de titanio (TiN_xO_y) mediante la técnica PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) [22], el depósito galvanostático de materiales como cromo negro, níquel negro (BN), cobalto negro (BC) entre otros, sobre metales reflectantes como: cobre (Cu), aluminio (Al) y acero inoxidable (SS). Los recubrimientos con estabilidad térmica aceptable están disponibles comercialmente en el mercado, conocidos como las superficies TiNOX clásicos, TiNOX Energy Cu y TiNOX Energy al (Figura 14) con los valores de absorptividad de 0,95 y emisividad de 0,04 que se deposita sobre superficies de cobre [23]. Este tipo de recubrimiento consta de varias capas funcionales de material, donde todos los materiales son 100% reciclables juntos o de forma independiente. Cada capa tiene un papel vital en la creación del absorbente ultra eficiente que alimenta los colectores solares [24](Figura 13).

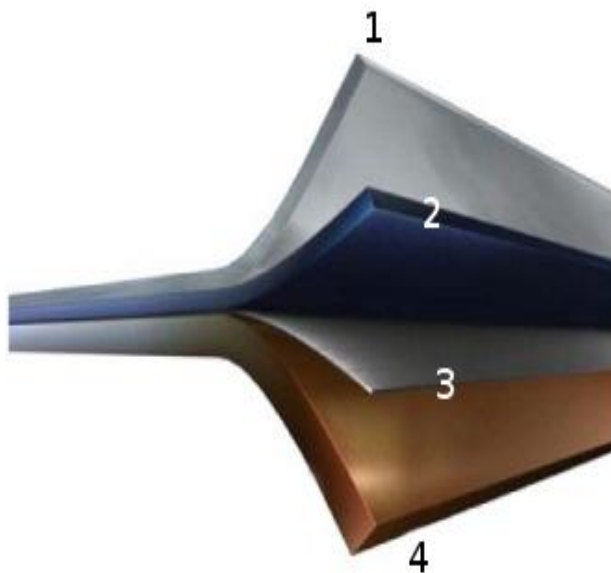


Figura 13. Tecnología solar térmica recubrimiento TINOX [24].

1) Vidrio de Cuarzo: Química y físicamente extremadamente resistente. Casi no hay ácido que pueda solubilizar el cuarzo. Este material duro es óptimo para la protección contra arañazos.

2) Titanio: Material extremadamente duro, resistente a la corrosión con bajos niveles de toxicidad. El titanio también es resistente a las altas temperaturas.

3) Carburo de titanio: esta capa actúa como barrera de difusión y capa de adhesión.

4) Cobre: El cobre no causa ningún problema de corrosión y es un gran reflector en el rango de ondas infrarrojas con la mayor conductividad térmica [24].

También, la superficie llamada Sunselect y mirotherm [25], depositada sobre superficies de cobre, tiene valores de absorptividad de 0,95 y emisividad de 0,05, con una dureza de material clasificado como semiduro y duro, respectivamente, y los ensayos de envejecimiento que permiten garantía de 10 años [26]. También, L. Wua et al [27], desarrolló un recubrimiento absorbente selectivo de $\text{CrN}_x\text{O}_y/\text{SiO}_2$, película sobre el sustrato $\text{Cu}(\text{Si})$ depositado con una técnica de pulverización catódica, que proporcionó una absorptividad de 0,947 y una emisividad de 0,05 a 80 °C.

Las mediciones de este recubrimiento revelaron, que la difusión, ya sea a través de todas las capas apiladas o cerca de la región de interfaz y por las interacciones químicas adyacentes en la interfaz son el talón de Aquiles de revestimientos solares térmicos para mantener una alta estabilidad térmica. Debido a esto, E. AlShamaileh [28] desarrolló un recubrimiento selectivo que presenta eficiencia de absorción solar en comparación con la pintura negra comercial utilizado en los sistemas de calefacción solar. El revestimiento se fabrica mediante la incorporación de partículas metálicas compuestas de una aleación de níquel-aluminio (NiAl) en pintura de color negro. Su comportamiento óptico con diferentes porcentajes de aleación de NiAl en el recubrimiento se estudió por espectroscopia ultravioleta-visible (UV-Vis) e infrarroja (IR). Actualmente, se está estudiando la aplicación en spray del Vantablack S-VIS en colectores solares, este es el recubrimiento más oscuro creado artificialmente y desarrollado por Surrey NanoSystems, el cual atrapa una cantidad masiva del 99,6% de la radiación incidente [29]. Sin embargo, no reportan datos de la emitancia, que es importante para poder catalogarlo como un recubrimiento selectivo solar óptimo.



Figura 14. Recubrimiento TiN de 95mm de espesor en un colector solar de placa plana.[21]

Se destaca el trabajo de investigación llamado “Estudio experimental comparativo de propiedades ópticas y mecánicas de superficies de captación solar ” por parte de la Universidad Tecnológica de Pereira, el cual se basa en el estudio experimental de dos pinturas llamadas pintura epóxica (fosfato de zinc) seguido de un polimérico de tipo comercial de color negro mate y la segunda un anticorrosivo (fosfato de zinc) con catalizador seguido de un acabado acrílico base solvente de color negro semi-mate poner referencia. Tal estudio entregó los siguientes resultados: el recubrimiento epóxico se clasifica en la escala del 4B-5B, indicando que tiene buenas propiedades de adherencia y que la pérdida por escama no supera el 5%. Mientras que el recubrimiento de acrílico aplicado sobre aluminio y cobre (prueba de adherencia método A) se clasifica como 5A lo que indica que no presentan descamación, también presenta una alta absorptancia (94%-95%) haciendo de estas pinturas, unos buenos recubrimientos para ser utilizados en el mantenimiento preventivo y correctivo de los sistemas de calentadores solares planos con tubo de cobre y aleta de aluminio o cobre [1]. Se destaca también trabajo llamado “Estudio experimental comparativo de propiedades ópticas y mecánicas de absorbedores solares, utilizando recubrimientos de alta absorptividad y baja emisividad a base de pinturas comerciales sobre superficies metálicas” realizado en la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco de México; en este estudio se trabajó con dos tipos de pinturas comerciales mexicanas llamadas Truper y Aero Comex sobre sustratos de aluminio, cobre y acero inoxidable 304. Como parte de los resultados, se presenta una absorptividad de 90-93% para ambas pinturas y una adherencia en la escala 5B para la pintura Comex sobre sustrato de aluminio, lo que indica que no presenta descamación y una buena adherencia.

La superficie selectiva o recubrimiento tiene como función principal un aumento de eficiencia solar térmica, proporcionando absorción solar en el espectro visible y cerca del infrarrojo (0.3-2.5 μm)

y baja emitancia en el infrarrojo dentro del espectro (2-20 μm), con esto se busca reducir las pérdidas térmicas [2].

En el siguiente capítulo se presenta una amplia descripción de los calentadores solares, dando a conocer sus componentes y su funcionamiento, también se presenta los tipos de recubrimientos y sustratos metálicos utilizados en este trabajo (pinturas comerciales de alta temperatura) y datos técnicos de las mismas. Se hablará del comportamiento de las pinturas de alta temperatura ante el Intemperismo y su durabilidad y finalmente se presentan las normas ASTM en las que se basó este trabajo de investigación.

CAPITULO 3

MARCO TEORICO

3.1. SISTEMAS DE CAPTACION SOLAR

Se hace a continuación una breve descripción de dos de los sistemas de captación solar más utilizados en la actualidad, desde el punto de vista comercial, los sistemas solares fotovoltaicos y los sistemas solares térmicos, estos últimos que son el centro de atención de esta tesis.

3.1.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: Es la agrupación y trabajo en conjunto de ciertos componentes eléctricos para lograr la transformación de la energía solar en energía eléctrica utilizable para cualquier dispositivo eléctrico convencional de una casa, un negocio o inclusive una industria. Para lograr la generación de este tipo de energía renovable, los componentes eléctricos básicos de un sistema fotovoltaico son: paneles solares, inversor, centro de carga y medidor bidireccional que se visualizan en la Figura 15 [30].



Figura 15. Componentes eléctricos básicos de un sistema fotovoltaico. [31]

El funcionamiento de un sistema fotovoltaico es posible gracias a los denominados paneles solares, donde gracias al efecto fotoeléctrico, la energía solar se convierte en energía eléctrica de corriente directa, la cual se puede utilizar de forma convencional, aunque las aplicaciones más numerosas se logran al transformarla en corriente alterna. Es aquí donde entra en juego la función del inversor, pieza clave del sistema fotovoltaico, ya que es él quien convierte la corriente para que sea compatible con cualquier tipo de instalación, tales como domésticas, comerciales o industriales. Posteriormente, dependiendo del tipo de sistema fotovoltaico, se pueden tener controladores de cargas que regulan el uso de la energía y un banco de baterías que permita el almacenamiento de la energía. Otro elemento importante es el centro de carga, ya que suele ser el punto de conexión o de distribución de la energía fotovoltaica para que finalmente, el medidor bidireccional registre la energía que se regresa a la red, cuando el sistema está interconectado a la red eléctrica. [30]

3.1.2 SISTEMAS TÉRMICOS: Los calentadores solares son, al mismo tiempo, captadores y almacenadores de la energía del sol; hay varios tipos de calentadores solares de agua que

pueden ser contruidos dependiendo de la necesidad (lugar de instalación) y de los materiales, todos con el principio de generar un efecto invernadero. Estos son utilizados para procesos industriales, comerciales y domésticos, tanto para aplicaciones térmicas como también para la generación de energía eléctrica a gran escala. Entre las aplicaciones térmicas existen diversas tecnologías de captación de energía solar y se pueden clasificar en:

- Calentadores de baja temperatura (30 °C a 70 °C), que son colectores de polipropileno, de tubo de vidrio y metálicos.
- Calentadores de media temperatura (de 71 °C a 250 °C), que son colectores solares plano, de tubos al vacío y de canales parabólicos.
- Calentadores de alta temperatura (251 °C a 1500 °C) colectores de concentración y de ultra concentración [32].

En esta investigación se trabaja en aplicaciones solares en el rango de bajas y medias temperaturas, por ende, se describe principalmente los colectores solares planos con cubierta de vidrio.

3.1.2.1. EL COLECTOR SOLAR PLANO

Es un tipo de panel solar térmico cuyo objetivo es transformar la radiación solar en energía térmica. Este tipo de captador solar tiene una buena relación costo/efectividad en climas moderados y se adapta correctamente a un gran número de aplicaciones de energía solar térmica (el calentamiento de agua sanitaria, la climatización de piscinas, el apoyo a calefacción, el precalentamiento fluidos industriales, etc.)

Podemos distinguir dos tipos básicos de colectores solares de placa plana, en función de la configuración del absorbedor: el paralelo de "tipo parrilla" (Figura 16 A), en las versiones vertical y horizontal y la serie de "tipo serpentín" (Figura 16 B). La diferencia que hay entre ambos es:

La configuración en paralelo favorece que se pueda estratificar la temperatura del colector solar por manejar un mayor volumen de circulación del agua por las ramificaciones del interior del captador y obtener así, un salto termodinámico de aproximadamente 10 °C con un buen rendimiento térmico y una baja caída de presión del fluido a calentar.

Mientras que la configuración en serie está compuesta por un único circuito continuo con poco volumen de agua de circulación y un salto térmico superior, pero con un buen rendimiento térmico, aunque con una mayor pérdida de presión del fluido a calentar. [33]

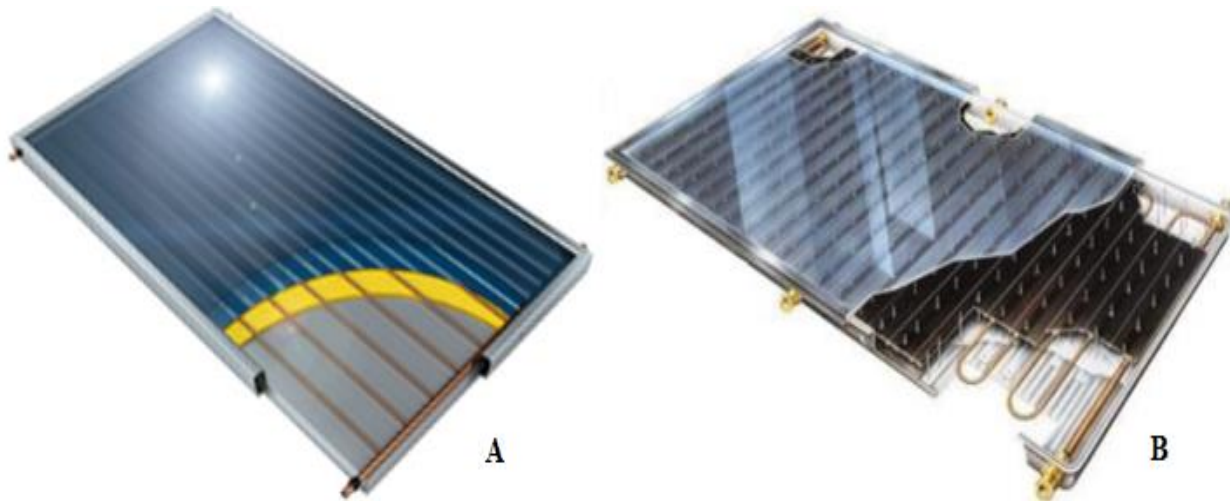


Figura 16. Tipos básicos de colectores solares de placa plana, en función de la configuración del absorbedor. (A) Tipo parrilla y (B) Tipo serpentín [34]

Otra forma de clasificar los colectores solares planos es si son vidriados o no vidriados:

El colector solar plano vidriado (Figura 17 B) se usa generalmente en sistemas de calefacción de agua domésticos o en instalaciones. La temperatura de funcionamiento es generalmente entre 30 °C y 60 °C. Consiste en una caja aislada cubierta por acristalamiento. En el interior, hay una placa absorbente en el que circula el fluido de transferencia de calor. El acristalamiento deja pasar la radiación de longitud de onda corta y de alta temperatura y bloquea la radiación infrarroja de baja temperatura y aísla el espacio de aire por encima de la placa absorbente para mantener la energía interna, lo que se conoce como efecto invernadero.

El colector solar plano no vidriado (Figura 17 A) es mucho más económico, pero menos extendido. Dependiendo de la temperatura exterior, generalmente se usa en sistemas de calefacción de piscinas, pero a veces se puede usar como sistema de calefacción de agua caliente en países cálidos. En zonas templadas, la temperatura de funcionamiento es generalmente inferior a 30 °C . Se compone únicamente de un absorbente, generalmente de plástico como el PVC, por el que circula el fluido refrigerante, generalmente agua [33].



Figura 17. (A) Colector solar sin cubierta. (B) Colector solar plano con cubierta [35].

3.1.2.2. FUNCIONAMIENTO DE UN COLECTOR SOLAR PLANO

Funcionan aprovechando el efecto invernadero, el mismo principio que se puede experimentar al entrar en un coche aparcado al sol en verano. El vidrio actúa como filtro para ciertas longitudes de onda de la luz solar: deja pasar fundamentalmente la luz visible, y es menos transparente con las ondas infrarrojas de menor energía. El sol incide sobre el vidrio del colector, que, siendo muy transparente a la longitud de onda corta de la radiación visible, deja pasar la mayor parte de la energía. Esta radiación solar calienta entonces la placa colectora que, a su vez, se convierte en emisora de radiación en onda larga o (infrarrojos), menos energética. Pero como el vidrio es muy opaco para esas longitudes de onda, a pesar de las pérdidas por transmisión, (el vidrio es un mal aislante térmico), el recinto de la caja se calienta por encima de la temperatura exterior. Al paso por la caja, el fluido caloportador que circula por los conductos se calienta, y transporta esa energía térmica a donde se desee o almacenarse en un recipiente aislado [36]. Para comprender mejor el conjunto de longitudes de onda de todas las radiaciones electromagnéticas se muestra a continuación la distribución espectral de la radiación solar.

• DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL DE LA RADIACIÓN SOLAR

La radiación electromagnética se puede ordenar en un espectro en diferentes longitudes de onda, como se muestra en la Figura 18, que se extiende desde longitudes de onda corta de billonésimas de metro (frecuencias muy altas), como los rayos gama, hasta longitudes de onda larga de muchos kilómetros (frecuencias muy bajas) como las ondas de radio. El espectro electromagnético no tiene definidos límites superior ni inferior y la energía de una fracción diminuta de radiación, llamada fotón, es inversamente proporcional a su longitud de onda, entonces a menor longitud de onda mayor contenido energético.

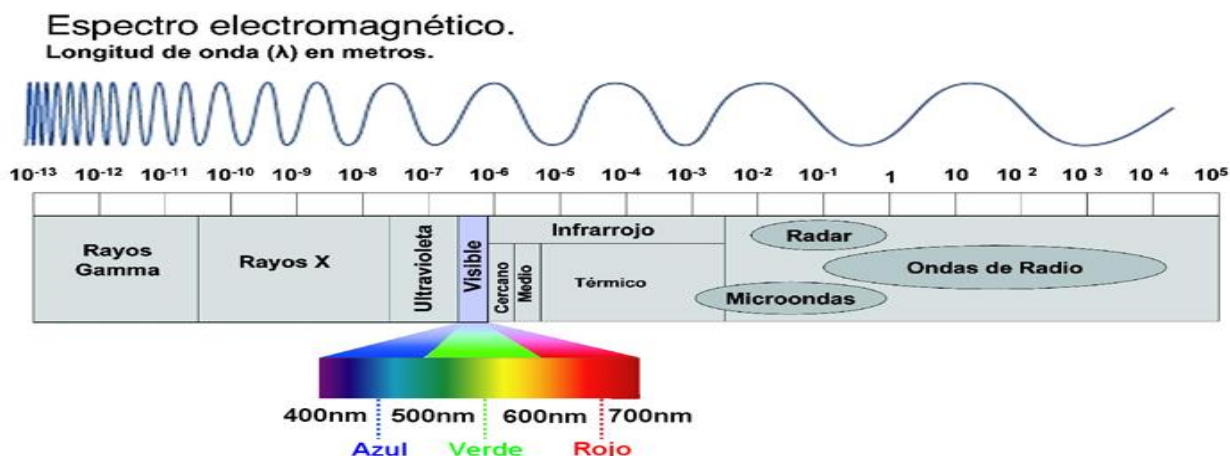


Figura 18. Espectro electromagnético de la radiación solar. [37]

El Sol emite energía en forma de radiación electromagnética de onda corta, principalmente en la banda del **ultravioleta, visible y el infrarrojo cercano**, con longitudes de onda entre 0,2 y 3,0 micrómetros (200 nm a 3.000 nm). Aproximadamente un 99% de la radiación solar que llega a la

superficie de la Tierra está contenida en la región entre 0,2 y 3,0 μm , mientras que la mayor parte de la radiación terrestre de onda larga está contenida en la región entre 3,5 y 50 μm (Figura 19). Las ondas en el intervalo de 0,25 μm a 4,0 μm se denominan espectro de onda corta, para muchos propósitos como en aplicaciones de celdas solares y en el proceso de la fotosíntesis.

1. La región visible (entre 400 nm y 700 nm) corresponde a la radiación que puede percibir la sensibilidad del ojo humano e incluye los colores: violeta (420 nm), azul (480 nm)-, verde (520 nm), amarillo (570 nm), naranja (600 nm) y rojo (700 nm). La luz de color violeta es más energética que la luz de color rojo, porque tiene una longitud de onda más pequeña. La radiación con las longitudes de onda más corta que la correspondiente a la luz de color violeta es denominada radiación ultravioleta. Los distintos colores de luz tienen en común el ser radiaciones electromagnéticas que se desplazan con la misma velocidad. Se diferencian en su frecuencia y longitud de onda. Dos rayos de luz con la misma longitud de onda tienen la misma frecuencia y el mismo color.

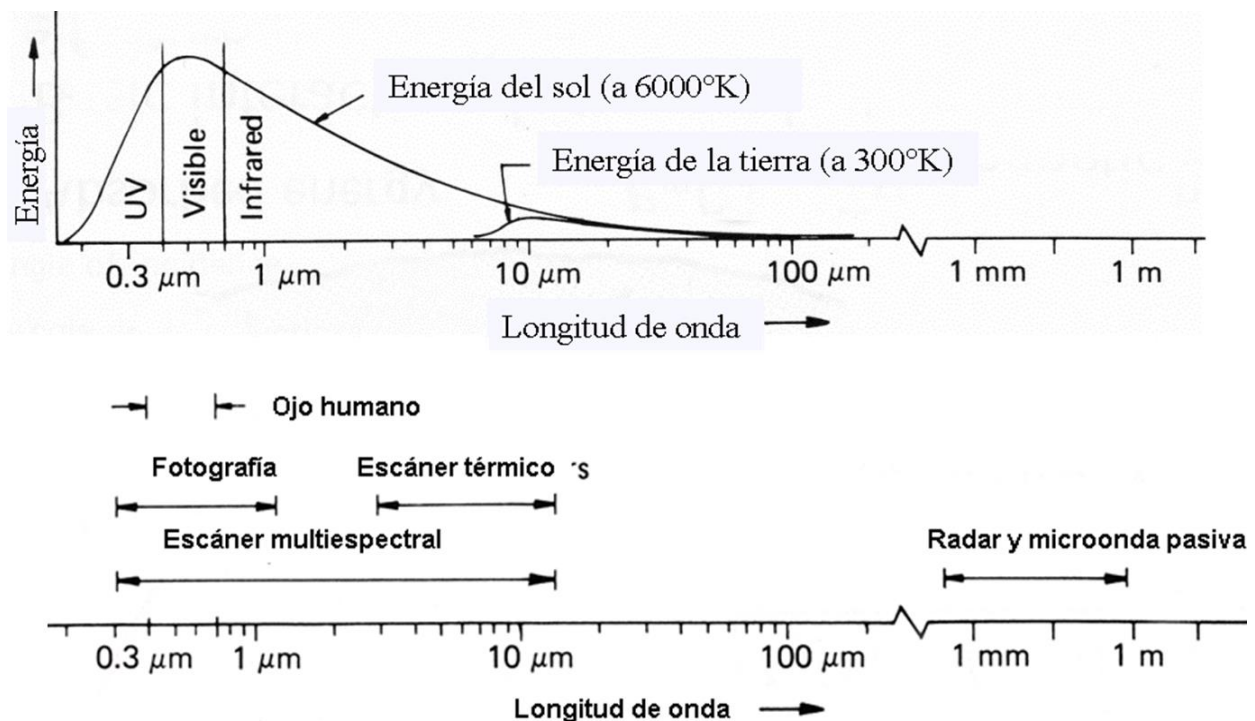


Figura 19. Energía radiada por el Sol y la tierra [37]

2. La región del ultravioleta está entre los 100 y los 400 nanómetros.
3. La región del infrarrojo cercano está entre los 700 y los 4000 nanómetros.

A cada región le corresponde una fracción de la energía total incidente en la parte superior de la atmósfera (denominada radiación solar extraterrestre) distribuida así: 7,2% al ultravioleta; 47,2% al visible y 45,6% al infrarrojo cercano. [37]

3.1.2.3. COMPONENTES PRINCIPALES DE UN COLECTOR SOLAR PLANO

El colector solar plano está formado por 4 elementos principales (Figura 20) [36]:

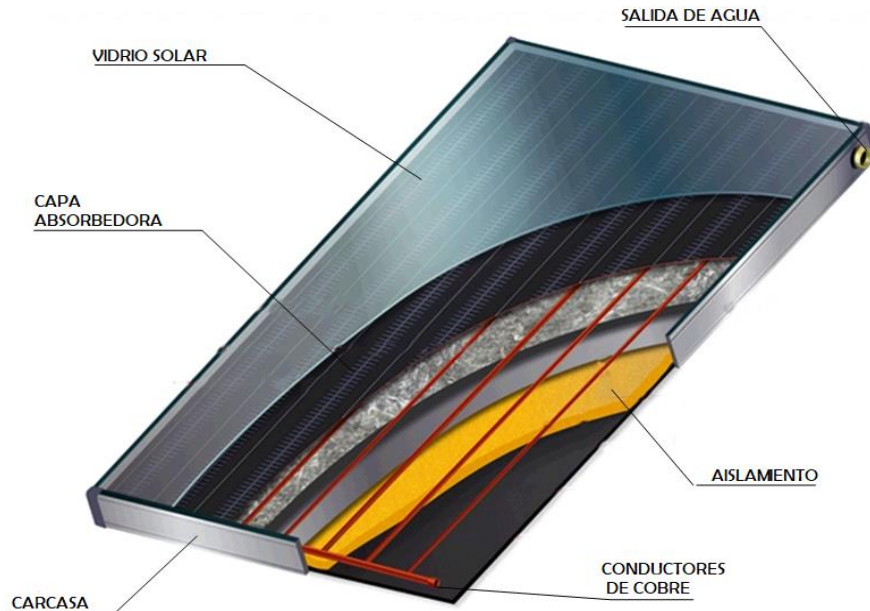


Figura 20. Colector solar plano con cubierta de vidrio y sus componentes [38]

1)) Cubierta transparente: Debe poseer las cualidades necesarias (coeficientes de transmisión y conductividad térmica adecuados) para provocar el efecto invernadero y reducir las pérdidas; asegurar la estanqueidad del colector al agua y al aire, en unión con la carcasa y las juntas; no mantener la suciedad adherida a la superficie exterior para que la lluvia resbale fácilmente.

2) Absorbedor: Recibe la radiación solar y la convierte en calor que se transmite al fluido caloportador.

Las formas son diversas: placas metálicas separadas unos milímetros, una placa metálica con tubos soldados o embutidos o dos placas metálicas con un circuito en su interior. La cara expuesta al sol debe captar la mayor cantidad de radiación por lo que se suele pintar de color negro o dotarla de una superficie selectiva (muy absorbente a la radiación de onda corta y de baja emisividad de la radiación de onda larga).

Las pinturas son más económicas que las superficies selectivas y tienen un mejor comportamiento térmico global con temperaturas cercanas a la del ambiente, pero algunas de éstas se estropean por la acción continuada de la radiación ultravioleta y con las variaciones de temperatura entre el día y la noche, sin embargo han aparecido en el mercado pinturas negras de alta temperatura que han tenido un mucho mejor comportamiento al intemperismo y por lo mismo, una mayor duración, además de ser muy bajo precio. Las superficies selectivas tienen en general un mejor

comportamiento y se obtienen por superposición de varias capas (metal y compuestos metálicos) o tratamientos especiales de la superficie, aunque sus costos de producción suelen ser elevados, así como la dificultad tecnológica para fabricarlas.

3) Aislamiento térmico: Se emplea para reducir las pérdidas térmicas en las partes trasera y laterales del absorbedor que debe ser de baja conductividad térmica. Los materiales pueden ser lana de vidrio, lana de roca, corcho, polietileno o poliuretano.

4) Carcasa: Generalmente de aluminio o de acero inoxidable, protege y soporta los elementos del colector, permitiendo además anclar y sujetar el colector a la estructura de montaje. Debe resistir los cambios de temperatura (dilataciones) sin perder la estanquidad y debe resistir la corrosión.

Hay que destacar que el absorbedor o llamada también capa o superficie absorbedora, tiene un papel primordial en la eficiencia térmica del colector, por lo que es necesario prestar atención a sus características y a la calidad de los materiales que lo forman (pinturas o superficies selectivas depositadas por técnicas físicas o químicas).

3.2. SUPERFICIES ABSORBEDORAS

El elemento principal de un colector solar plano es la placa absorbedora. Esta consiste en una lámina metálica con buenas características de transmisión de calor (fabricadas, por ejemplo, en aluminio o cobre en una superficie sola o en varias placas) con revestimiento negro o con revestimiento selectivo de alta absorptividad y baja emisividad y tubos de transferencia de calor (usualmente el material utilizado es el cobre) ligados al colector (Figura 21). La función de esta placa es absorber la radiación solar de onda corta y transferir el calor al fluido que está circulando por los tubos. La optimización térmica de la placa absorbedora es posible a través del tratamiento de la placa metálica, por ejemplo, con un revestimiento de pintura negra común o selectiva [1].

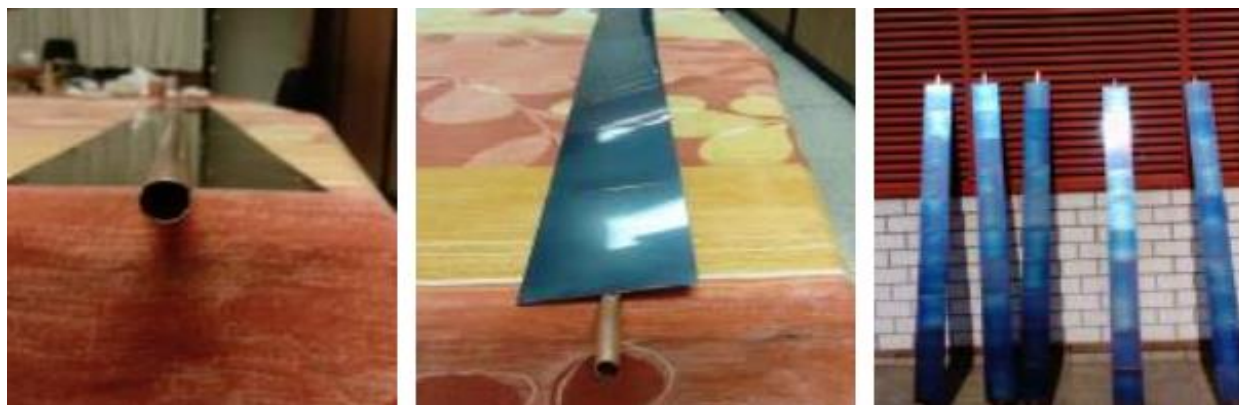


Figura 21. Placa absorbedora sobre aleta de cobre [39]

3.2.1. RECUBRIMIENTOS A BASE DE PINTURAS COMERCIALES DE ALTA TEMPERATURA Y TIPO DE SUSTRATOS UTILIZADOS

En esta investigación se trabaja con dos tipos de pinturas específicas para altas temperaturas que se encuentran comercialmente en el mercado colombiano. La primera, es de una marca colombiana llamada Pintuco y la segunda, es de una marca estadounidense llama Rust Oleum.

- **Pintuco Aerocolor Pintura en Aerosol para Altas Temperaturas:** Recomendada para proteger superficies metálicas, expuestas a temperaturas de hasta 350°C, la pintura es de color negro mate. La superficie para pintar no debe tener exposición directa a la llama. De acabado parejo y uniforme, secado rápido, alto rendimiento, mayor resistencia, y duración. Se aplica directamente sin necesidad de bases o anticorrosivo [40] (Figura 22 A).
- **Rust-oleum® high heat:** Es un esmalte protector y resistente de color negro brillante que renueva y protege superficies expuestas a altas temperaturas. Es ideal para superficies metálicas de interior o exterior expuestas al calor, ya que resiste temperaturas de hasta 650 °C sin perder o modificar su color. Aporta un acabado mate con poder anticorrosivo, que puede ser aplicado incluso sobre óxido bien adherido [41] (Figura 22 B).

Para depositar las pinturas y crear la superficie absorbedora, se trabajó con tres tipos de sustratos metálicos, aluminio, cobre y acero inoxidable – 304 que se visualizan en la Figura 23, para poder así, realizar una comparación de las propiedades ópticas, mecánicas y de durabilidad de las pinturas de alta temperatura respecto a estos tres tipos de sustratos.



Figura 22. Dos tipos de pinturas de altas temperaturas utilizadas como absorbedores solares. (A) Marca Pituco [40]. (B) Marca Rust Oleum [41].



Figura 23. Tipos de sustratos metálicos empleados (A) Acero inoxidable 304. (B) Cobre. (C) Aluminio

3.2.2. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE LAS PINTURAS DE ALTA TEMPERATURA Y DESCRIPCION DE LA TÉCNICA DE DEPÓSITO UTILIZADA

TECNICA DE DEPOSITO

El método empleado se conoce como aspersión con aire, y hablando de pinturas, los productos comerciales disponibles se asemejan a un aerosol o también llamado spray.

Un spray es un recipiente herméticamente cerrado que contiene en su interior un producto principal (en este caso, la pintura de alta temperatura), más un gas que actúa como propelente (es un gas que presuriza el interior del bote de spray, y sirve como vehículo del producto principal del contenido del spray, que puede ser aire a presión u otros gases). Ambos elementos se encuentran a una presión bastante superior a la atmosférica en el interior del spray. El envase está dotado de una válvula tipo tobera que permite la salida de propelente y del producto cuando es accionada, haciendo pasar el contenido del spray a través de una boquilla dosificadora (pulsador) que lo atomiza en finísimas partículas (Figura 24). Casi siempre estos productos son mono-componente, es decir, que no necesitan un catalizador para que tenga lugar el secado. El secado de estos productos se produce por evaporación de los solventes que los componen.

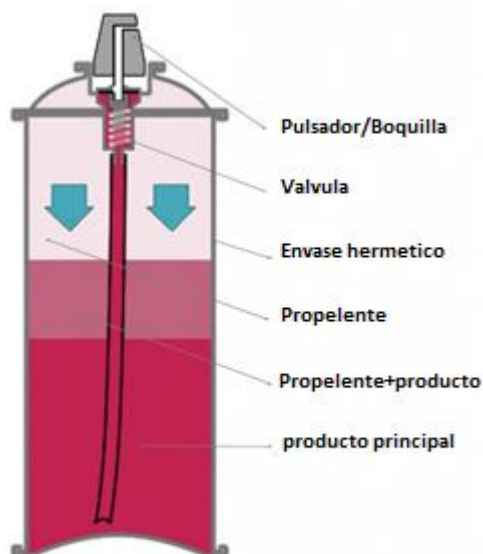


Figura 24. Esquema de un aerosol y sus componentes [42]

En sprays de pintura, los propelentes más utilizados son los hidrocarburos derivados del petróleo (propano, butano, etc) y el dimetil éter. Una parte importante de estos gases permanece en estado líquido en el interior del spray por efecto de la presión, por lo que deben ser miscibles con el producto principal. Cuando el propelente entra en contacto con la atmósfera recupera su estado gaseoso y se disipa con facilidad [42].

MODO DE APLICACIÓN

- a) **Agitar enérgicamente el bote de spray:** Las pinturas están compuestas principalmente de pigmentos, resinas y solventes, los cuales pueden disociarse en parte durante almacenamientos más o menos prolongados. Esto hace que los componentes más pesados se depositen en el fondo del spray, lo cual provocaría un funcionamiento incorrecto del spray y un comportamiento inadecuado del producto si se usa el spray sin haberlo agitado convenientemente. Para facilitar el remezclado de los componentes de la pintura y de la parte líquida del propelente, los sprays de pintura contienen en el interior una bola de acero o vidrio que impacta contra las paredes del spray durante el agitado haciendo que el producto apelmazado en el fondo del envase se integre con el resto de los componentes.
- b) **Aplicar el producto en varias capas:** Rociar la pintura accionando el pulsador a una distancia de entre 15 y 25cm del objeto.
- c) **Limpiar la boquilla:** Una vez concluida la aplicación de la pintura es necesario limpiar la boquilla para que los restos de producto en la misma no se sequen y pueda reutilizarse el spray [42].

DESCRIPCION TECNICA DE LAS PINTURAS DE ALTA TEMPERATURA

- **PINTUCO**

Especificaciones técnicas	
Color	Negro
Resistente a los rayos UV	Si
Rendimiento	Sobre Metal 1,5 m ² /300 ml a 2 capas* Sobre las demás superficies el rendimiento puede variar.
Temática	Altas temperaturas
Aplicación	Aplicar la pintura a 30 cm (aprox.) de la superficie. Pintar en sentido horizontal o vertical. Hacerlo por capas delgadas dejando secar mínimo 10 minutos entre capa y capa. Elegir un lugar ventilado, sin polvo y en un día cálido. Luego de aplicar, airear la pieza por al menos 15 minutos antes de exponerle a altas temperaturas.
Uso	Alta resistencia
Preparación de la superficie	La superficie para pintar debe estar seca, libre de mugre, polvo, óxido y grasa. Si se va a aplicar sobre una superficie ya pintada se recomienda lijar y remover la pintura existente para obtener una mejor adherencia.
Tiempo de secado al tacto	10 minutos
Secado final	15 minutos
País donde se fabrica (Procedencia)	Colombia
Peso	300 gramos
Limpieza y cuidado	Luego de aplicar, airear la pieza por al menos 15 minutos antes de exponerle a altas temperaturas
Almacenamiento	Almacenar el producto tapado en un lugar bajo techo, seco y alejado de fuentes de calor, a no más de 50 °C.
Recomendaciones	Mantenga fuera del alcance de los niños. Evite el contacto con la piel y los ojos. No consuma alimentos mientras manipula el producto. Aplique en un lugar con buena ventilación, alejado de toda fuente de calor, y utilice guantes, gafas de seguridad y mascarilla para solventes orgánicos. Mantenga el aerosol bien tapado mientras no se esté utilizando.

Tabla 2. Especificaciones técnicas de la pintura en aerosol para altas temperatura de marca Pintuco [43]

▪ **RUST OLEUM**

Especificaciones técnicas	
Color	Negro brillante
Tipo de resina	Silicona modificada
Tipo de pigmentos	Ferrita de manganeso negro, negro cromita
Solventes	Acetona, hidrocarburos aromáticos
Resistente a los rayos UV	No
Rendimiento	De 1 m^2 a 1.5 m^2
Peso	340 gramos
Aplicación	Agitar la lata enérgicamente durante un minuto después de que la bola de mezclado comience a sonar. Si la bola de mezclado no suena, no golpee la lata. Sostenga la lata en posición vertical a una distancia de 25 a 35 cm de la superficie y rocíe con un movimiento uniforme de un lado al otro, superponiendo ligeramente cada pasada. Procure que la lata esté siempre en movimiento mientras rocía. Mantenga la lata a la misma distancia de la superficie.
Tiempos de secado a 70-80 °F (21-27 °C) y 50 % de humedad relativa	-Al Tacto 30 minutos -Manipular 1 a 2 horas -Capa nueva Dentro de la hora o luego de 48 horas Curado completo
Vida útil	5 años
Origen	Estados unidos
Preparación de la superficie	Quitar toda la suciedad, grasa, aceite, sal y contaminantes químicos lavando la superficie con un detergente comercial u otro método de limpieza adecuado. Enjuagar con agua fresca y dejar secar completamente. Quite la pintura suelta y el óxido con un cepillo de alambre o lija. Las superficies previamente pintadas deben estar sanas y en buenas condiciones. Los acabados suaves, duros o brillantes deben marcarse mediante el lijado para crear un perfil de superficie

Tabla 3. Especificaciones técnicas de la pintura en aerosol para altas temperatura de marca Rust Oleum [44] [45]

3.2.3. COMPORTAMIENTO DE LAS PINTURAS DE ALTA TEMPERATURA ANTE EL INTEMPERISMO Y SU DURABILIDAD

Las pinturas anti calóricas o también llamadas de alta temperatura son productos formulados con una serie de resinas de tipo sintético y unos pigmentos con la capacidad de soportar las altas temperaturas. Este tipo de pintura son una excelente solución para la industria, ya que tienen muchísimas ventajas que las hacen competentes, algunas de esas ventajas es una larga vida útil y alto rendimiento, ya que este tipo de esmalte conserva sus propiedades incluso con un uso prolongado. Tienen una alta resistencia, soporta roces y pequeños golpes manteniéndose en perfecto estado, así como el efecto de diferentes agentes químicos. Presenta buena adherencia y gran elasticidad que hace que no se cuartee ni presente grietas ante los cambios de temperatura, incluso aunque sean bruscos [46].

Para conocer las propiedades y características físicas y químicas de las pinturas de alta temperatura y así valorar su utilidad en la aplicación como superficie absorbedora, es necesario utilizar las técnicas de caracterización. En esta investigación, las técnicas se dividen en 3 categorías: Caracterización óptica, mecánica y pruebas de durabilidad.

3.3. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS SUPERFICIES ABSORBEDORAS

La caracterización de los recubrimientos se llevó a cabo en el Laboratorio de Propiedades Magnéticas y Magneto-ópticas de nuevos materiales, en colaboración con el Laboratorio de Metalografía de la Universidad Tecnológica de Pereira.

3.3.1. CARACTERIZACION OPTICA

La absortancia, reflectancia y la emitancia son propiedades importantes para el estudio óptico de los materiales o recubrimientos. A continuación, se encuentran descritas, respectivamente, por las siguientes ecuaciones y definiciones.

Emitancia

La emitancia es la cantidad total de energía radiante de todas las longitudes de onda que es emitida por un cuerpo por unidad de tiempo y unidad de superficie. [47]

La emitancia monocromática es la cantidad de energía radiante de una determinada longitud de onda λ emitida por un cuerpo por unidad de superficie y de tiempo. Se define en la forma:

$$\varepsilon_{\lambda}(\theta, \beta) = \frac{\text{Intensidad monocromática emitida por una superficie en una dirección determinada}}{\text{Intensidad monocromática } I_{b\lambda} \text{ que un cuerpo negro emitiría a la misma temperatura}} = \frac{I_{\lambda(\theta, \beta)}}{I_{b\lambda}} \quad (1)$$

La emitancia direccional $\varepsilon(\theta, \beta)$ es una propiedad de la superficie y se define en la forma [48]:

$$\varepsilon (\theta, \beta) = \frac{\text{Intensidad total emitida en la dirección } (\theta, \beta)}{\text{Intensidad del cuerpo negro } I_b} = \frac{1}{I_b} \int_0^\infty \varepsilon_\lambda (\theta, \beta) I_{b\lambda} d\lambda \quad (2)$$

En conclusión, La emitancia total, para todo el espectro de la radiación procedente de una superficie, es la suma de todas las radiaciones monocromáticas que salen de dicha superficie.

Emisividad

Es la relación entre la emitancia total de un cuerpo y la del cuerpo negro a la misma temperatura (T). Se simboliza por ε [47]

Absortancia

La absortancia direccional monocromática se define como la fracción de la radiación incidente de longitud de onda λ desde la dirección θ, β (donde θ es el coseno del ángulo polar y β es el ángulo azimutal) que es absorbida por la superficie. Se representa a través de la siguiente ecuación:

$$\alpha_\lambda (\cos\theta_{sn}, \beta_s) = \frac{(I_\lambda)_\alpha (\cos\theta_{sn}, \beta_s)}{(I_\lambda)_i (\cos\theta_{sn}, \beta_s)} \quad (3)$$

En donde el subíndice i indica radiación incidente y el subíndice α indica radiación absorbida.

La fracción de toda la radiación (en todas las longitudes de onda) de la dirección θ, β que es absorbida por una superficie se denomina absortancia direccional y se define mediante la siguiente ecuación: [48]

$$\alpha (\theta, \beta) = \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda (\theta, \beta) I_\lambda (\theta, \beta)_i d\lambda}{(I_\lambda)_i (\theta, \beta)} = \frac{1}{(I_\lambda)_i (\theta, \beta)} \int_0^\infty \alpha_\lambda (\theta, \beta) I_\lambda (\theta, \beta)_i d\lambda \quad (4)$$

Reflectancia

Se define reflectancia como el cociente entre la potencia (o flujo) reflejada y la potencia incidente, es decir [49]:

$$R = \frac{I_r A \cos(\theta_r)}{I_i \cos(\theta_i)} = \frac{I_r}{I_i} \quad (5)$$

La reflectancia de una muestra se expresa como una fracción entre 0 y 1 o como un porcentaje entre 0 y 100. El espectro de reflectancia es el grafico de la reflectividad en función de la longitud de onda. [50].

En esta investigación se estudiaron estas propiedades ópticas mediante espectros de reflectividad, absortividad y medición de la emisividad térmica.

3.3.1.1. ESPECTROS DE REFLECTIVIDAD Y ABSORTIVIDAD

Se obtuvieron espectros de reflectividad para cada tipo de recubrimiento por medio de un Espectrofotómetro UV-Visible Evolution™ 220, con esfera integradora en un rango espectral de 200 a 1100 nm, % Reflectancia como modo de orden de escaneo y ancho de banda del espectro de 2 nm que se visualiza en la Figura 25.



Figura 25. Espectrofotómetro UV-Visible Evolution™ 201/220

Se realiza la calibración del equipo haciendo como primera medida una línea de base de un material reflectivo llamado spectralon. Los espectros de reflectividad se tomaron basados en la norma ASTM E424-71 [52] y se tomaron en el Laboratorio de Investigación de Propiedades Magnéticas y magneto-ópticas de nuevos materiales en la Universidad Tecnológica de Pereira.

Según el principio de conservación de la energía se tiene que:

$$E = A + R + T \quad (6)$$

Donde A= Absortancia, B=Reflectancia y T=Transmitancia

Y dividiendo la ecuación 6 por la energía incidente (E) se obtiene:

$$1 = \frac{A}{E} + \frac{R}{E} + \frac{T}{E} \quad \text{o bien: } 1 = \alpha + \rho + \tau \quad (7)$$

Donde:

$\alpha = A/E$ = fracción de la radiación que es absorbida = poder absorbente = **absortividad**.

$\rho = R/E$ = fracción de la radiación que se refleja = poder reflexivo = **reflectividad**.

$\tau = T/E$ = fracción de la radiación que se transmite = poder transmisivo = **transmisividad**. [47]

Para realizar los espectros de absortividad, se despejo la absortividad (α) de la ecuación 7 teniendo en cuenta que los metales se consideran opacos, por ende, poseen una transmisividad tan baja que

puede considerarse nula frente a la absorptividad y reflectividad, es decir se toma $T=0$. Dando como resultado:

$$\text{Absortividad} = 1 - \text{Reflectividad} \quad (8)$$

3.3.1.2. EMISIVIDAD TERMICA

La medición de la emisividad térmica se realizó basada en la norma ASTM E1933-99 [53], la cual presenta dos tipos de métodos:

▪ Método del termómetro de contacto

1. Se coloca la cámara termográfica en un trípode o dispositivo de soporte en la ubicación deseada y a la distancia recomendada por el fabricante de la cámara termográfica de la muestra.
2. Se apunta la cámara hacia la muestra y se enfoca en la porción de donde la emisividad va a ser medida.
3. Utilizando las herramientas de la cámara termográfica se configura el punto de medición apropiado como la temperatura de punto, cruceta o isoterma para medir y compensar la temperatura reflejada que es el error incidente sobre la muestra.
4. Se usa un termómetro de contacto para medir la temperatura del punto o área.
5. Se registra la temperatura.
6. Sin mover la cámara, se ajusta el control de emisividad de la cámara termográfica hasta que la temperatura sea la misma que se registró anteriormente.
7. La emisividad indicada en la cámara termográfica es el valor de la medida de la muestra.
8. Repetir los pasos un mínimo de tres veces y el valor promedio de los valores de emisividad es la emisividad medida.

▪ Método sin el termómetro de contacto

1. Se coloca la cámara termográfica en un trípode o dispositivo de soporte en la ubicación deseada y a la distancia deseada de la muestra.
2. Se apunta la cámara hacia la muestra y se enfoca en la porción de donde la emisividad va a ser medida.
3. Utilizando las herramientas de la cámara termográfica se configura el punto de medición apropiado como la temperatura de punto, cruceta o isoterma para medir y compensar la temperatura reflejada que es el error incidente sobre la muestra.
4. Se aplica un material que modifica la superficie **a**, o inmediatamente adyacente a **a**, en la porción de la muestra donde la emisividad va a ser medida.
5. Ingresar el valor de emisividad conocido de la superficie del material en la cámara termográfica.

6. Usando la cámara termográfica se mide la temperatura del material y se registra la temperatura.
7. Enfocar la cámara termográfica en la muestra que es a donde se desea medir la emisividad o eliminar el material de la muestra de la superficie.
8. Sin mover la cámara, se ajusta la herramienta del control de emisividad hasta que la cámara termográfica indique la misma temperatura registrada en el punto 6, la emisividad indicada es el valor de la emisividad medida de la muestra a esta temperatura.
9. Repetir los pasos un mínimo de tres veces y el valor promedio de los valores de emisividad es la emisividad medida.

El material más comúnmente utilizado para determinar la emisividad por el método sin el termómetro de contacto es la cinta de aislar con una emisividad conocida de 0.95, pero, ya que la cinta de aislar a temperaturas mayores de 100 °C se degrada [2], se procedió a utilizar la emisividad de negro de humo como referencia. Se empleó el método sin el termómetro de contacto para conocer la emisividad de los recubrimientos, y las mediciones de la temperatura del negro de humo y del recubrimiento se realizaron por medio de la cámara termográfica FLUKE Ti400. En la Figura 26 se puede visualizar el montaje experimental para medir la emisividad.



Figura 26. Montaje experimental para medir la emisividad.

3.3.2. CARACTERIZACION MECANICA

3.3.2.1. ESPESOR

La medición del espesor de los recubrimientos se realizó utilizando dos equipos (Figura 27). El positector modelo 6000 de la marca DeFelsko especial para sustratos metálicos y el medidor de espesor marca CEM, referencia DT-156. El ajuste o calibración de los instrumentos se realizó con el valor de láminas de calibración de diferentes espesores. Se tomaron 5 muestras por recubrimiento con el fin de poder garantizar repetividad y así, encontrar el valor promedio del espesor.



Figura 27. Equipos para la medición de espesores. (A) positector modelo 6000, DeFelsko. (B) medidor de espesor marca CEM, DT-156

3.3.2.2. ADHERENCIA

La prueba de adherencia se realizó mediante la utilización de la norma designada ASTM D 3359 [54] por el método de ensayo B. El método B (espesores menores a 50 μm) consiste en hacer un corte rayado formando un enrejado de 2 mm de separación y hacer seis cortes sobre la muestra cómo se visualiza en la Figura 29. Para realizar la prueba se utilizó cinta Elcometer 99 (Figura 28), el centro de ésta se coloca en la intersección de los cortes en una misma dirección (vertical y horizontal) con el menor ángulo de inclinación, se suaviza la cinta con el dedo en la zona de las incisiones y luego se frota firmemente (Figura 30); después de 30 a 90 s de aplicación se retira aprovechando el extremo libre y tirando de él con rapidez.



Figura 28. Cinta Elcometer 99 utilizada conformemente al estándar ASTM D3359 – el método de corte de trama cruzada para medir la adherencia utilizando la prueba con la cinta [55]



Figura 29. Corte rayado formando un enrejado de 2 mm de separación.



Figura 30. Aplicación de la cinta elcometer sobre el rayado del recubrimiento.

Clasificación de los resultados de adhesión

Clasificación	Porcentaje de area retirada	Superficie del area desde la cual ha ocurrido el desprendimiento para 6 cortes paralelos y rango de adhesión por porcentaje
5B	0% ninguna	
4B	Menos 5%	
3B	5% a 15%	
2B	15% a 35%	
1B	35% a 65%	
0B	Mas de 65%	

Tabla 4. Clasificación de los resultados de la prueba de adhesión conforme a la norma ASTM D3359-09 por el método B [54]

En la Tabla 4, se puede visualizar la clasificación de los resultados de adherencia y la superficie del área una vez haya ocurrido el desprendimiento de la cinta elcometer en el recubrimiento; para hacer la evaluación de la adherencia del recubrimiento se utiliza la siguiente escala:

5B Los bordes de los cortes son completa parejas, ningún cuadro del enrejado formado por los cortes esta suelto. Representa el nivel más alto de adherencia.

4B Pequeñas escamas de recubrimiento están sueltas en las intersecciones menos el 5% del área afectada.

3B Pequeñas escamas del recubrimiento están sueltas a lo largo de los bordes y en las intersecciones de los cortes. El área afectada es entre el 5% y el 15% del enrejado formado por los cortes.

2B El revestimiento se ha astillado a lo largo de los bordes de los cortes y en la parte de las esquinas. El área afectada es entre el 15% y 35% del rejado.

1B El revestimiento se ha rasgado a lo largo de los bordes en jirones grandes y se ha desprendido cuadros enteros; el área afectada es entre el 35% y el 65% del enrejado.

0B Cuando el desprendimiento es peor que el grado 1 del 65% al 100% del enrejado. [54]

3.3.3. PRUEBAS DE DURABILIDAD

Las pruebas de durabilidad son pruebas en las que los recubrimientos se someten a ciertos tipos de esfuerzos, ya sean mecánicos, mecanotermicos o mecanoquimicos durante un cierto periodo de tiempo. Se realizan con el fin de conocer el tiempo de vida útil, comportamiento, el tiempo en que el recubrimiento tiene una estabilidad de las propiedades (saber si presenta algún deterioro o desgaste) y resistencia ante condiciones ambientales, por ejemplo, la humedad, el calor del sol, etc.

El deterioro de los materiales sometidos a condiciones ambientales adversas durante su vida útil es uno de los problemas de mayor importancia en el sector productivo [56], por esta razón, en este trabajo se someten los recubrimientos a pruebas de cámara salina, para evaluar y estudiar su comportamiento en un ambiente químicamente activo y estipular el ciclo de vida de este. Las pruebas de corrosión en una cámara salina son uno de los ensayos que existen para la evaluación y control de este fenómeno. Estos ensayos son empleados, para exponer los recubrimientos a condiciones extremas en donde puedan deteriorarse debido a la corrosión. La cámara salina, crea un ambiente salino con humedades altas, y normalmente 35 °C de temperatura, donde exponen el material en el interior, a una niebla salina continua y corrosiva y están documentados por las normas ASTM B 117 [57] y ISO 9227 [58].

Los recubrimientos presentan reacciones adversas al ser expuestos a condiciones climáticas naturales, estas condiciones pueden causar fallas y desgastes no deseados, los tres principales factores que afectan a la degradación los materiales y recubrimientos son las radiaciones solares (energía luminosa), la temperatura (calor) y el agua (humedad). En este trabajo se realiza pruebas de Intemperismo natural, para conocer y evaluar los recubrimientos a estas condiciones

ambientales, permitiendo la mejora de la resistencia de los materiales y productos a las condiciones climatológicas.

A continuación, se presenta el modo de aplicación de las dos pruebas de durabilidad que se realizaron para conocer el comportamiento de los recubrimientos ante condiciones ambientales.

3.3.3.1. CÁMARA SALINA

El experimento de niebla salina consiste en exponer la pieza objeto del ensayo a una niebla salina durante un cierto período de tiempo en el interior de la cámara, bajo condiciones controladas (temperatura, presión, flujo de agua destilada, humedad relativa, etc). El tiempo transcurrido desde que se introdujo la pieza o artículo hasta que comienza el ataque de la corrosión, proporciona una medida de la capacidad de resistencia del metal constituyente o del recubrimiento a dicho ataque. Los parámetros de funcionamiento de la cámara se presentan en la Tabla 5.

Temperatura	35 (+1.1 -1.7) °C
Suministro de aire	El suministro de aire comprimido a la boquilla o boquillas para de atomizar la solución salina, debía estar libre de aceite y suciedad y mantenerse entre 69 kPa/m ² y 172 kPa/m ² (10 psi y 25 psi).
Flujo de agua destilada	50 litros de agua con 2650 gramos de sal analítica. en promedio dura 5 días.
Sal	La sal utilizada fue cloruro de sodio sustancialmente libre de níquel y cobre y que contiene en la base seca no más de 0,1 % de yoduro de sodio y no más de 0,3 % de impurezas totales.

Tabla 5. Parámetros de funcionamiento de la cámara salina de la UTP

Para la evaluación de los resultados de cámara salina se utilizó la norma ASTM D 610-08 [59], la cual hace la Evaluación del grado de oxidación de superficies pintadas. Esta norma proporciona un medio estandarizado para cuantificar la cantidad y distribución óxido en la superficie. Para estudiar los resultados obtenidos basados en la norma, se tiene en cuenta las siguientes características:

- Identificación de la muestra o área evaluada.
- Grado de óxido (puntuación de 0 a 10).
- La distribución de óxido utilizando S para localizada, G para la General, P por puntos y H para Híbridos.

El experimento se realizó en la cámara salina del laboratorio de corrosión de la Universidad Tecnológica de Pereira (Figura 31). Se sometieron recubrimientos a base de pintura Pintuco sobre

aluminio y acero inoxidable, y recubrimientos a base de Rust Oleum sobre sustratos de aluminio y acero inoxidable.



Figura 31. Cámara salina del laboratorio de corrosión en la Universidad Tecnológica de Pereira.

3.3.3.2. INTEMPERISMO NATURAL

La prueba de Intemperismo natural consiste en exponer las muestras de los recubrimientos depositados sobre los sustratos metálicos a un ambiente natural, es decir, un ambiente en el que podrá medir el tiempo de degradación que puedan sufrir las muestras al estar expuestas a factores naturales como la radiación UV, la salinidad, temperatura, humedad y la acidez del ambiente, los cuales tendrán una gran influencia en las características físicas de los recubrimientos. Las pruebas se instalaron en la terraza del edificio Santa Marta de la ciudad de Pereira, Colombia. En la Figura 32 se puede visualizar el tipo de caja que se utilizó para realizar dicha exposición.



Figura 32. Caja para pruebas de intemperismo natural

En el siguiente capítulo se presentan el proceso experimental, los resultados y el análisis de las técnicas de caracterización realizadas.

CAPITULO 4

PROCESO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

En este capítulo se presenta el proceso de preparación y limpieza de los sustratos metálicos utilizados para el depósito de las pinturas comerciales de alta temperatura, se presenta la discusión de los resultados obtenidos a partir de la fase experimental de la investigación, es decir, después de haber realizado la caracterización óptica, mecánica y pruebas de durabilidad para cada recubrimiento, realizando una comparación entre los resultados obtenidos de cada recubrimiento sobre los tres tipos de sustratos (aluminio, cobre y acero inoxidable 304).

4.1. PREPARACIÓN DE LOS SUSTRATOS

4.1.1. PROTOCOLO DE PULIDO

En esta investigación se utilizaron sustratos de aluminio, cobre y acero inoxidable 304. Ya que las superficies de las láminas metálicas no son uniformes se procedió a realizar un pulimiento sobre cada uno de los sustratos antes de depositar las pinturas, con el fin de que la superficie fuera lo más uniforme posible y obtener al final una superficie exenta de rayas para una mejor adherencia del recubrimiento.

En la Figura 33 se pueden observar los tres tipos de sustratos, antes y después de realizar el proceso de lijado. Se procedió a realizar el pulimiento con papel abrasivo (lijas) de diferentes tamaños de grano (150, 200, 400, 600, 1000, 1200, 1500 y 2000) en presencia de abundante agua.

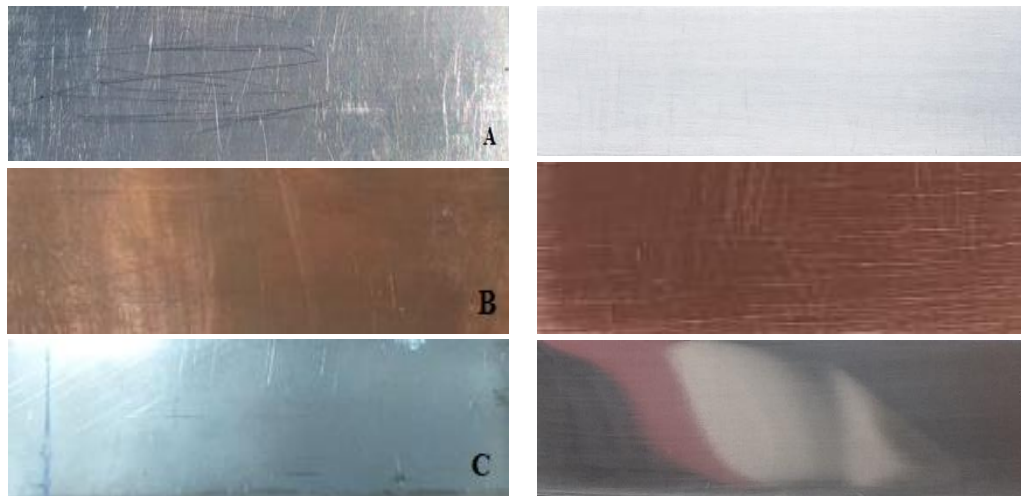


Figura 33. Sustratos metálicos antes (izquierda) y después (derecha) del proceso de lijado. (A)Aluminio. (B)Cobre. (C)Acero inoxidable.

El procedimiento que se realizó para obtener una superficie exenta de rayas fue girar la muestra noventa grados al cambiar de lija, ya que estos giros permitieron ver claramente el rayado en la superficie, lo que se deseaba evitar era tener rayas perpendiculares entre si y que la superficie fuera lo más homogénea posible. En el caso del cobre también se deseaba eliminar la capa protectora de

óxido que se crea cuando está en contacto con la atmósfera. Se presenta en la Figura 34 imágenes del proceso experimental de lijado.

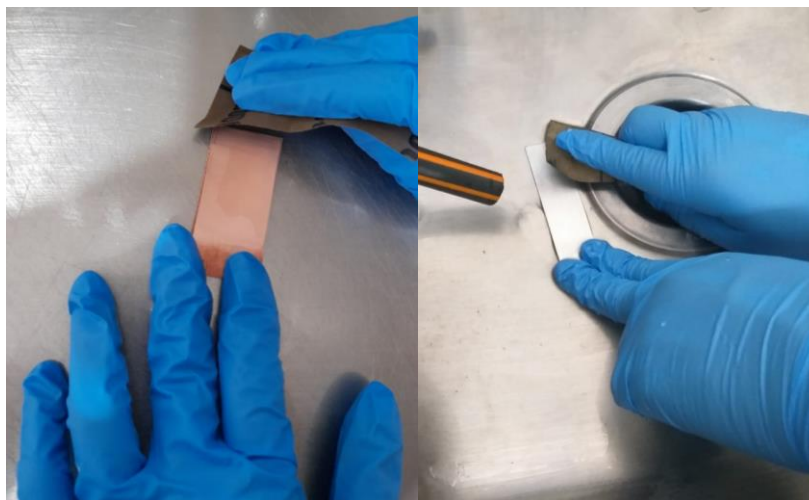


Figura 34. Proceso experimental de lijado de sustratos metálicos

4.1.2. PROTOCOLO DE LIMPIEZA- BAÑO ULTRASÓNICO

El baño ultrasónico tiene como propósito eliminar las impurezas que quedaron adheridas a las superficies de los sustratos después del proceso de lijado. El procedimiento de limpieza tuvo el siguiente orden:

- Se organizan los sustratos dentro de un beaker (Figura 35 A) y se lavan con acetona durante 20 minutos (Figura 35 B).
- Posteriormente se cambia la acetona por metanol y se lavan durante otros 20 minutos. (Figura 35 B)

El equipo empleado es un ultrasonido BK-10XF que se visualiza en la Figura 35 C. La acetona y el metanol quita grasas y compuestos orgánicos, y la cavitación del baño ultrasónico desprende aglomerados de partículas adheridos a los sustratos.



Figura 35. Proceso experimental de la limpieza de sustratos en baño ultrasónico

4.2. APLICACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS SOBRE LOS SUSTRATOS

El método empleado para los depósitos de las pinturas de alta temperatura fue el método por spray. Primero se acomodaron los sustratos y se colocó una cinta adhesiva en uno de los extremos para proteger una parte del sustrato y así poder manipularlo sin necesidad de tocar el recubrimiento (Figura 36). Se acomodaron de tal manera que todos los recubrimientos fueran depositados bajo las mismas condiciones (distancia entre la boquilla de la pintura y sustrato (25 a 30 cm) y número de capas depositadas (las cuales fueron tres).

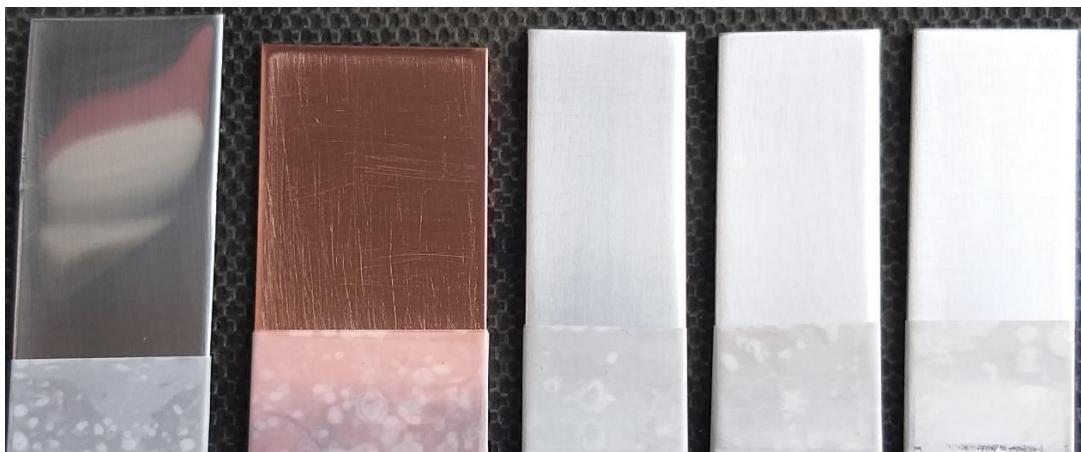


Figura 36. Sustratos listos para depositar

Se siguen los pasos de aplicación en spray empleados en el capítulo 3, en el ítem 3.2.2.1.1, en donde se agita el spray durante dos minutos y se aplican las pinturas en varias capas teniendo a consideración una distancia entre 25 a 30 cm entre el spray y la superficie a depositar.

En la Figura 37 se muestran las pinturas de alta temperatura ya depositadas sobre los sustratos metálicos. Las pinturas depositadas son de la marca Pintuco y Rust Oleum. Una vez aplicadas las pinturas, se dejaron secar al ambiente durante 15 a 24 horas.



Figura 37. Pintura Pintuco de alta temperatura y pintura Rust Oleum de altas temperaturas depositadas sobre sustratos de aluminio, acero inoxidable 304 y cobre.

En la Tabla 6 se procede a etiquetar cada una de las muestras depositadas con su respectiva nomenclatura.

Nomenclatura	Nombre de la muestra
PAL#	Pintuco depositado sobre sustrato de aluminio lijado. + (Número de la muestra).
PCL#	Pintuco depositado sobre sustrato de cobre lijado. + (Número de la muestra).
PAIL#	Pintuco depositado sobre sustrato de acero inoxidable 304 lijado. + (Número de la muestra).
RAL#	Rust Oleum depositado sobre sustrato de aluminio lijado. + (Número de la muestra).
RCL#	Rust Oleum depositado sobre sustrato de cobre lijado. + (Número de la muestra).
RAIL#	Rust Oleum depositado sobre sustrato de acero inoxidable 304 lijado. + (Número de la muestra).

Tabla 6. Nomenclatura de las muestras depositadas sobre sustratos metálicos.

RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LAS TECNICAS DE CARACTERIZACION

En esta sección se presenta el procedimiento de todas las mediciones realizadas, los resultados obtenidos y el respectivo análisis de la caracterización óptica, mecánica y de durabilidad de los recubrimientos. Este apartado se divide en las siguientes secciones:

- Caracterización mecánica sin pruebas de durabilidad
 - Medición de espesores
 - Adherencia
- Caracterización óptica sin pruebas de durabilidad
 - Medición de emisividad térmica
 - Espectros de absortividad
- Pruebas de durabilidad en cámara salina
 - Medición de espesores
 - Procedimiento de exposición a cámara salina.
- Resultados de la caracterización óptica y mecánica después de someter las muestras a pruebas de durabilidad en cámara salina.
 - Espectros de absortividad
 - Emisividad
 - Adherencia

- Pruebas de durabilidad de Intemperismo natural
- Aplicación de una capa reflectiva para reducir la emisividad térmica

4.3. CARACTERIZACION MECANICA SIN PRUEBAS DE DURABILIDAD

4.3.1. MEDICIÓN DE ESPESORES

Para conocer el espesor de los recubrimientos aplicados sobre los sustratos metálicos se utilizó un positector marca CEM, referencia DT-156.

En la Tabla 7 se presenta el valor promedio de espesores de cada una de las muestras sometidas a pruebas de adherencia y en la Figura 38 se presenta la forma en que se tomó los espesores con el positector y el equipo calibrado. Para la calibración del equipo se configuró el equipo en modo “habilitar calibración” y se realizaron 10 mediciones sobre una de las láminas de calibración como se visualiza en la Figura 38 A hasta que el equipo marcara el mismo espesor de la lámina (250 μm).

MEDICION DE ESPESORES						
Muestras	PAL01	RAL01	PAIL01	RAIL01	PCL01	RCL01
Espesor promedio (μm)	17.56	16	48,25	49	23,8	18,5

Tabla 7. Valor promedio de espesores de las muestras sometidas a pruebas de adherencia



A



B

Figura 38. Medición de espesor con el positector CEM DT-156

4.3.2. ADHERENCIA

La evaluación de adherencia de las pinturas comerciales de alta temperatura Pintuco y Rust Oleum depositadas sobre sustratos de aluminio, cobre y acero inoxidable se realizó basados en la norma ASTM D3359 por el método de ensayo B (método para espesores menores a 50 μm).

Primero se realizó el corte transversal sobre los recubrimientos haciendo uso de un bisturí con punta fina, se realizaron 6 líneas paralelas entre si con una distancia entre cada una de 2mm, después, perpendiculares a esas líneas, se realizaron otras 6 líneas quedando un enrejado de 25 cuadros como se visualiza en la Figura 39. Se colocó un trozo de cinta ELCOMETER con el menor ángulo de inclinación posible sobre el enrejado, dejando uno de los extremos libres y se froto la cinta con el dedo haciendo presión en la zona de las incisiones (Figura 41). Se esperó 60 segundos y se retiró la cinta rápidamente aprovechando el extremo libre a un ángulo de 180° aproximadamente (Figura 42) para conocer que tanto recubrimiento desprendió la cinta del sustrato. En la Figura 40 se puede visualizar un trozo de cinta elcometer después de realizar el desprendimiento.



Figura 39. Corte en enrejado haciendo uso de un bisturí de punta fina



Figura 40. Trozo de cinta elcometer después de realizar el desprendimiento

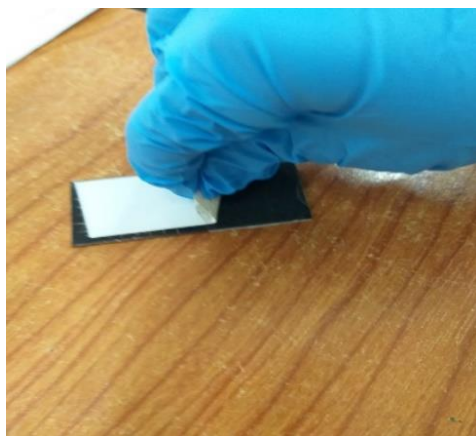


Figura 41. Cinta elcometer sobre el corte enrejado



Figura 42. Desprendimiento de la cinta elcometer a un ángulo de 180°

Los resultados de la prueba de adherencia se realizan basados en la norma ASTM D3359 [54] mediante la Tabla 8:


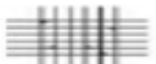




Clasificación de los resultados de adhesión		
Clasificación	Porcentaje de area retirada	Superficie del area desde la cual ha ocurrido el desprendimiento para 6 cortes paralelos y rango de adhesión por porcentaje
5B	0% ninguna	
4B	Menos 5%	
3B	5% a 15%	
2B	15% a 35%	
1B	35% a 65%	
0B	Mas de 65%	

Tabla 8. Clasificación de los resultados de adhesión norma ASTM D3359

Y para hacer la evaluación de la adherencia del recubrimiento se utiliza la siguiente escala:

- **5B** Los bordes de los cortes están completos y no presento desprendimiento. Representa el nivel más alto de adherencia.
- **4B** Pequeñas escamas de recubrimiento están sueltas en las intersecciones, el área afectada es menor del 5%.
- **3B** Pequeñas escamas del recubrimiento están sueltas a lo largo de los bordes y en las intersecciones de los cortes. El área afectada es entre el 5% y el 15% del enrejado formado por los cortes.
- **2B** El revestimiento se ha astillado a lo largo de los bordes de los cortes y en la parte de las esquinas. El área afectada es entre el 15% y 35% del rejado.
- **1B** El revestimiento se ha rasgado a lo largo de los bordes en jirones grandes y se ha desprendido cuadros enteros; el área afectada es entre el 35% y el 65% del enrejado.
- **0B** Cuando el desprendimiento es peor que el grado 1 del 65% al 100% del enrejado

En la Tabla 9 se presentan las respectivas fotografías y clasificación de adherencia de cada una de las muestras después de que se realizó el rayado y el desprendimiento de la cinta Elcometer.

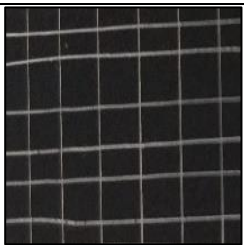
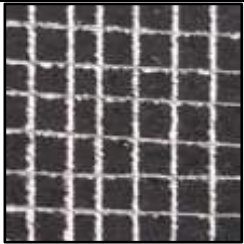


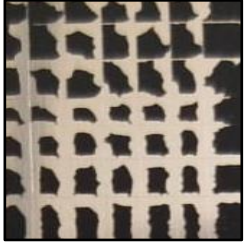

MUESTRA	FOTOGRAFÍA	EVALUACIÓN
PAL01		5B
RAL01		5B
PCL01		0B
RCL01		3B
PAIL01		2B
RAIL01		5B

Tabla 9. Resultados de la prueba de adherencia para las muestras de Pintuco y Rust Oleum sobre sustratos de cobre, aluminio y acero inoxidable 304.

Basados en los resultados obtenidos de cada muestra, se tiene que las muestras RAIL01, PAL01 y RAL01 presentaron una excelente adherencia, con una clasificación de 5B, lo que da como resultado que los bordes del corte están completamente lisos y ninguna de las esquinas de la cuadrícula se desprendió.

En el caso de la adherencia de la muestra PAIL01 se presenta un desprendimiento de grado 2B, donde el área de corte afectado es significativamente mayor del 15%, pero esto no es mayor del 35%, es decir que la pintura tuvo un deterioro a lo largo de los bordes de los cortes y en la parte de las esquinas. La muestra RCL01 tuvo un grado de adherencia de 3B, lo que significó que la pintura tuvo un leve desprendimiento de pequeñas escamas del recubrimiento; el porcentaje de área afectada esta entre el 5% y el 15% del enrejado formado por los cortes. Y, la muestra PCL01 presento un desprendimiento de grado 0B, donde da como resultado que el porcentaje de área removida de la pintura fue mayor a 65% y no tuvo una buena adherencia sobre el sustrato de cobre. Se puede concluir que la pintura Rust Oleum presenta una excelente y mejor adherencia que la pintura Pintuco sobre los sustratos metálicos utilizados.

Se toma en consideración que el grado de adherencia de las pinturas es de gran importancia ya que puede asegurar la completa protección de la superficie a la que es aplicada y la durabilidad de la pintura. Por ende, como uno de los objetivos de este trabajo es dar a conocer cuál de las dos pinturas presenta mejores propiedades para ser aplicadas como capa absorbedora, se decidió, basados en los resultados de adherencia, descartar para las siguientes pruebas de caracterización la muestra PCL01 que presenta un grado de 0B de adherencia y así, realizar mayor énfasis en los demás recubrimientos.

4.4. CARACTERIZACION OPTICA SIN PRUEBAS DE DURABILIDAD.

4.4.1. MEDICIÓN DE LA EMISIVIDAD TÉRMICA

Las mediciones de la emisividad se realizaron basadas en la norma ASTM 1933-99 [53] mediante el método sin el termómetro de contacto. La norma señala la medición de la emisividad térmica utilizando principalmente una cámara termográfica y un material de referencia.

Se realizó el siguiente procedimiento:

Primero, se realizó el montaje experimental haciendo uso de una placa calefactora de marca Benchmark Scientific H4000-HS de 500 W, que permitió elevar la temperatura de las muestras para realizar mediciones de emisividad térmica a diferentes temperaturas. Se fabricó una caja blanca con material Icopor de 2,5 cm de espesor y con paredes de papel de aluminio que permitió que la temperatura del sistema no se dispersara y no fuera afectada por las corrientes de aire del ambiente. Se colocaron las muestras encima de una placa de acero inoxidable que permitió mantener una estabilidad de la temperatura en todas las muestras y posteriormente, se colocó esta placa de acero inoxidable sobre la placa calefactora para que las muestras se calentaran como se observa en la Figura 43.



Figura 43. Montaje muestras sobre placa calefactora

El Segundo paso, fue aplicar un material que modificara la superficie del recubrimiento para tenerlo como referencia para la medición de emisividad térmica. El material más comúnmente utilizado como referencia para determinar la emisividad por el método sin el termómetro de contacto es la cinta de aislar con una emisividad conocida de 0.95, pero, ya que la cinta de aislar a temperaturas mayores de 80 °C se degrada, se procedió a utilizar como referencia, la emisividad del negro de humo (0.93), ya que era un material que resistía elevar la temperatura sin que tuviera una degradación. Se realizó la aplicación del negro de humo utilizando la llama de una vela y pasando el sustrato en varias capas por la llama como se muestra en la Figura 44. El negro de humo se depositó en el espacio que se cubrió con cinta adhesiva en el sustrato antes de depositar las pinturas, se tuvo cuidado ya que el negro de humo es un material muy delicado y puede ensuciar el recubrimiento de la pintura depositada.



Figura 44. Aplicación el negro de humo como material de referencia

Tercero, se situó la cámara termográfica en un trípode a una distancia entre la lente de la cámara y las muestras de 1 metro aproximadamente. Posteriormente se realizó la respectiva configuración y calibración de la cámara termográfica Fluke Ti400 para realizar las mediciones de la forma correcta siguiendo estos pasos:

1. Se encendió la cámara termográfica y se esperó 40 segundos a que esta iniciara.

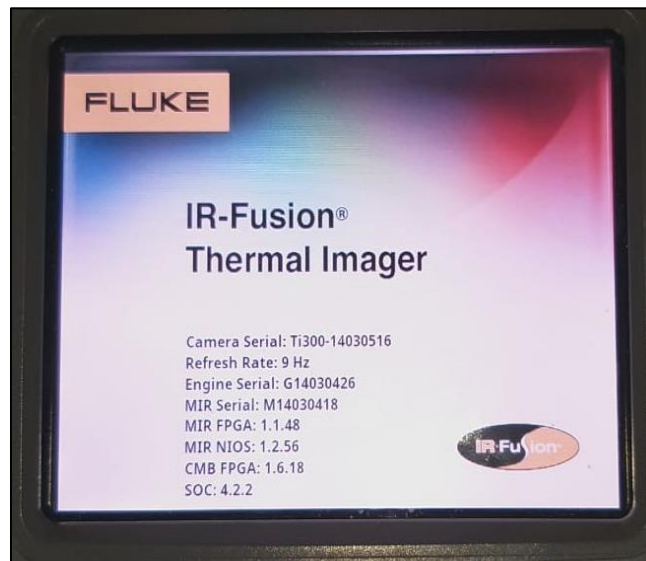


Figura 45. Iniciación Cámara termográfica

2. Se apretó el botón de función F2 de la cámara termográfica para abrir el menú principal.



Figura 46. Método de acceso a menú principal cámara termográfica

3. En la interfaz del menú se procedió a dar clic en “medida” donde se encontraron todos los parámetros que debían ser configurados para una correcta medición, tales como: Rango de temperatura, emisividad, segundo plano y marcadores.



Figura 47. parámetros de configuración cámara termográfica

4. Para ajustar el rango de la temperatura se siguieron los siguientes pasos: MENU → Medida → Rango. En esta investigación se trabajó en el rango de 3, es decir de -20 a 650 °C.

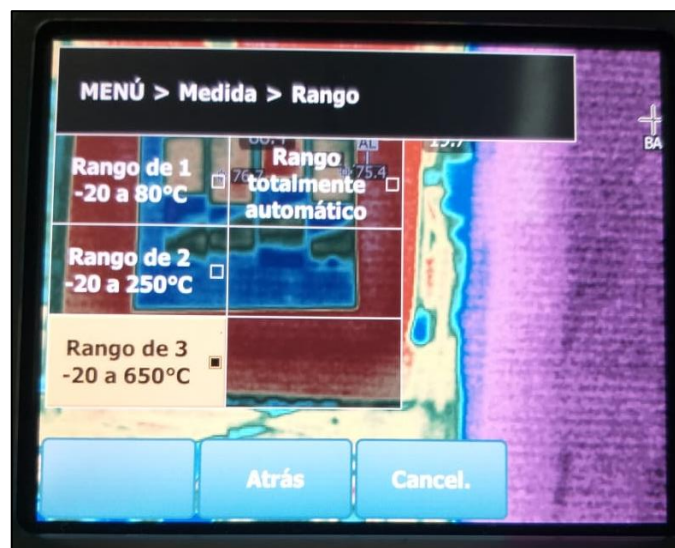


Figura 48. Ajuste rango de temperatura

5. Para ajustar el valor de emisividad térmica de la cámara, se siguieron los siguientes pasos: MENU → Medida → Emisividad → Ajustar valor. La emisividad térmica empleada como referencia fue el valor de la emisividad térmica del negro de humo (0.93).

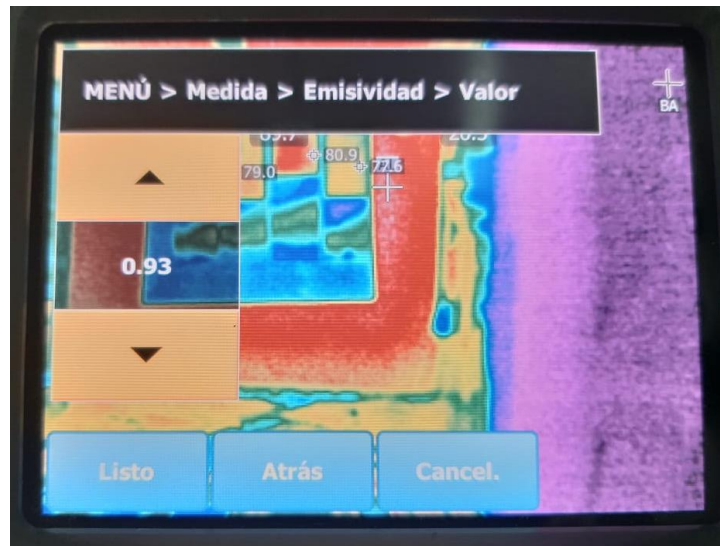


Figura 49. Ajuste valor de emisividad de referencia

6. Para ajustar la temperatura del ambiente, es decir el segundo plano se siguieron los siguientes pasos:

MENU→Medida→Segundo plano. La temperatura del medio ambiente se varió con el fin de hacer una climatización de la cámara y para tener un punto de partida o de comparación ya que no es un medidor absoluto.

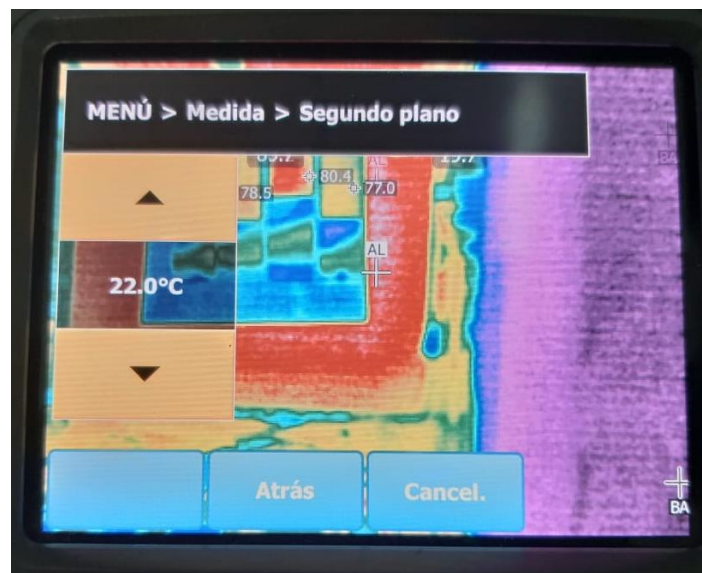
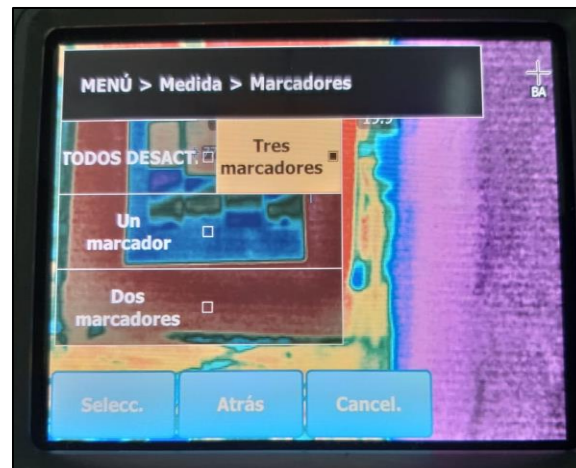


Figura 50. Ajuste temperatura de segundo plano

7. La cámara termográfica brindó la posibilidad de realizar hasta tres mediciones al mismo tiempo, ya que en pantalla había disponibles tres marcadores de puntos térmicos fijos ajustables. Se siguieron los siguientes pasos:

MENU→Medida→Marcadores. Una vez se dio clic en tres marcadores, aparecieron las etiquetas Listo, Siguiente y Cancelar. El primer marcador se adecuó en el negro de humo de una de las muestras y después se dio clic en la etiqueta siguiente hasta que se colocaron los tres marcadores en el negro de humo de tres muestras distintas.



A



B

Figura 51. (A) Ajuste marcadores utilizados. (B) Colocación marcador sobre la superficie de humo negro

8. Con la cámara termográfica se midió la temperatura del material (negro de humo) y una vez se estabilizó, se registró ese valor de temperatura (Figura 52).
9. Después, se colocaron los tres marcadores sobre los recubrimientos de las pinturas que es donde se deseaba medir el valor de emisividad térmica y sin mover la cámara, se ajustó la herramienta del control de emisividad hasta que la cámara termográfica indicó la misma temperatura que se registró en el negro de humo (Figura 53), por lo que la emisividad

térmica indicada era el valor de la emisividad térmica medida de la muestra a esta temperatura.

Se presenta en la Figura 54 el montaje final de todo el procedimiento de la medición de la emisividad térmica. Se repitió el mismo procedimiento tres veces a diferentes temperaturas (variando la perilla de la placa calefactora) y el valor promedio de los valores de emisividad térmica, fue la emisividad térmica medida y reportada. Se presenta en la Tabla 10 los resultados obtenidos.



Figura 52. medición de la temperatura ya estabilizada en el negro de humo

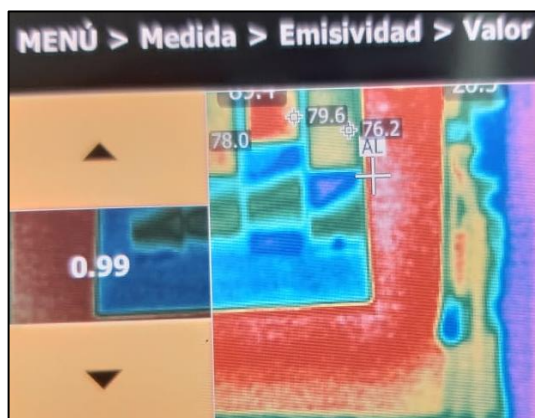


Figura 53. Variación ajuste de la emisividad para encontrar el mismo valor de temperatura hallado en el negro de humo.



Figura 54. Montaje experimental medición de emisividad

EMISIVIDAD TERMICA					
	MUESTRAS				
TEMPERATURA (°C)	PAL02	RAL02	PAIL02	RAIL02	RAIL02
100	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
150	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
205	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
Valor promedio emisividad	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99

Tabla 10. Valor de emisividad térmica tomada para todos los recubrimientos

Basados en los resultados obtenidos en la Tabla 10, se puede apreciar que todas las muestras presentaron un alto valor de emisividad térmica de 0.99 en las temperaturas medidas (100 °C, 150 °C y 205 °C). Este comportamiento se pudo presentar debido a que las muestras medidas son recubrimientos a base de pinturas de color negro y terminado mate, por ende, tienden a comportarse como un cuerpo negro, el cual tiene como característica tener el valor de emisividad más alto ($\epsilon = 1$).

4.4.2. ESPECTROS DE REFLECTIVIDAD Y ABSORTIVIDAD

Los espectros de absorptividad se realizaron basados en la relación:

$$\text{Absortividad} = 1 - \text{Reflectividad} \quad (8)$$

Los valores de reflectividad se tomaron de los espectros de reflectividad que se midieron por medio de un Espectrofotómetro UV-Visible Evolution™ 220, con esfera integradora en un rango espectral de 200 a 1100 nm. Este espectrofotómetro contiene una lámpara de Mercurio instalada que ayuda a realizar automáticamente la verificación de la exactitud de la longitud de onda y así asegurar resultados y además, contiene una lámpara de Xenón que no requiere calentamiento para realizar más mediciones en menor tiempo, es un monocromador de alta precisión y entrega una colección rápida de barrido de datos y exactitud de longitud de onda [60].

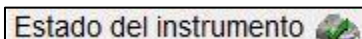
En la Tabla 11 se presentan algunas especificaciones importantes del espectrofotómetro UV-Visible Evolution™ 220.

Diseño óptico	Doble haz con posiciones para muestras y cubeta de referencia; Geometría de haz adecuada a la aplicación; Monocromador Czerny-Turner
Ancho(s) de banda del espectro	Variable: 1 nm; 2 nm;
Fuente de luz	Lámpara flash de xenón
Detector	Fotodiodos de silicona dobles
Modos de orden de escaneado	Absorbancia, % Transmitancia, % Reflectancia, Kubelka-Munk, log (1/R), log (Abs), Factor Abs*, Intensidad
Longitud de onda	190 –1.100 nm
Exactitud	± 0,8 nm (rango completo 190 a 1.100 nm) ± 0,5 nm (546,11 nm línea de mercurio)
Fuente de alimentación	100 – 240 V, 50 – 60 Hz, seleccionada automáticamente 150 W máximo

Tabla 11. Especificaciones Espectrofotómetro UV-Visible Evolution™ 220 [60]

Se presentan a continuación los pasos realizados para la medición de los espectros de reflectividad:

1. Se encendió el espectrofotómetro UV-VIS y se esperó 5 minutos a que el software del equipo (software Thermo Scientific™ INSIGHT 2™) leyera de manera exitosa el estado del instrumento. Esto se verifico cuando apareció el siguiente icono.



2. Las mediciones se realizaron por el método de esfera integradora y se tomó la opción de barrido.



Figura 55. selección método de esfera integradora y barrido

3. Se realizó la configuración del instrumento para realizar las mediciones como se muestra en la Figura 56.

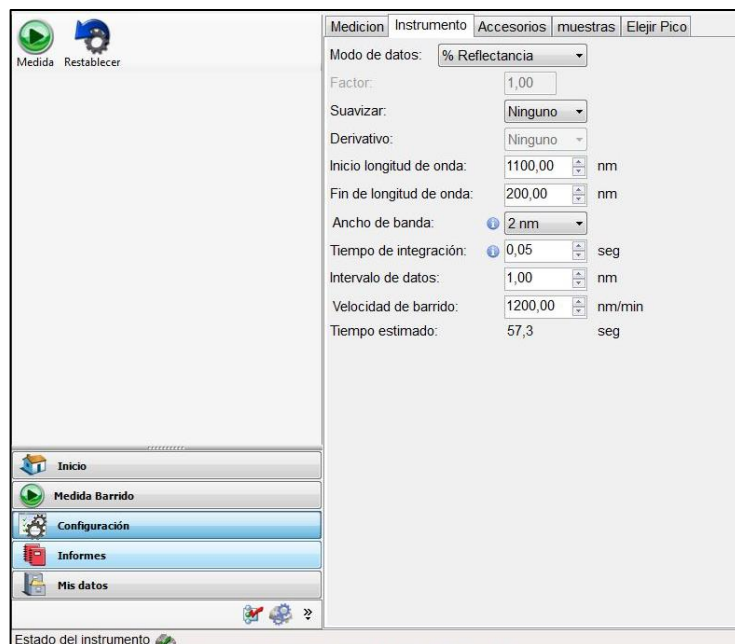


Figura 56. Configuración del instrumento

4. Se organizó el accesorio ISA-220 (accesorio de esfera integradora) en su configuración de reflectancia (Figura 57). Se instaló en la parte derecha del compartimento de muestras para colocar la muestra en el punto focal del haz de medición (Figura 58).



Figura 57. Accesorio ISA-220 con configuración para reflectancia



Figura 58. Instalación en la parte derecha del Accesorio ISA-220

5. La primera medición que se realizó fue la de la línea base (Figura 59A) para la calibración del equipo. La muestra que se utilizó fue un material reflectivo llamado spectralon que se muestra en la Figura 59 B, proporciona la reflectancia difusa más alta de cualquier material o recubrimiento conocido sobre la región UV-VIS-NIR del espectro.



Figura 59. Calibración del instrumento. (A) Manera de medir la línea base. (B) Material reflectivo llamado spectralon.

6. Una vez hecha la calibración del equipo se procedió a realizar las mediciones de los espectros de reflectividad de cada una de las muestras, dando clic en medida y nombrando los espectros de cada muestra con un ID.

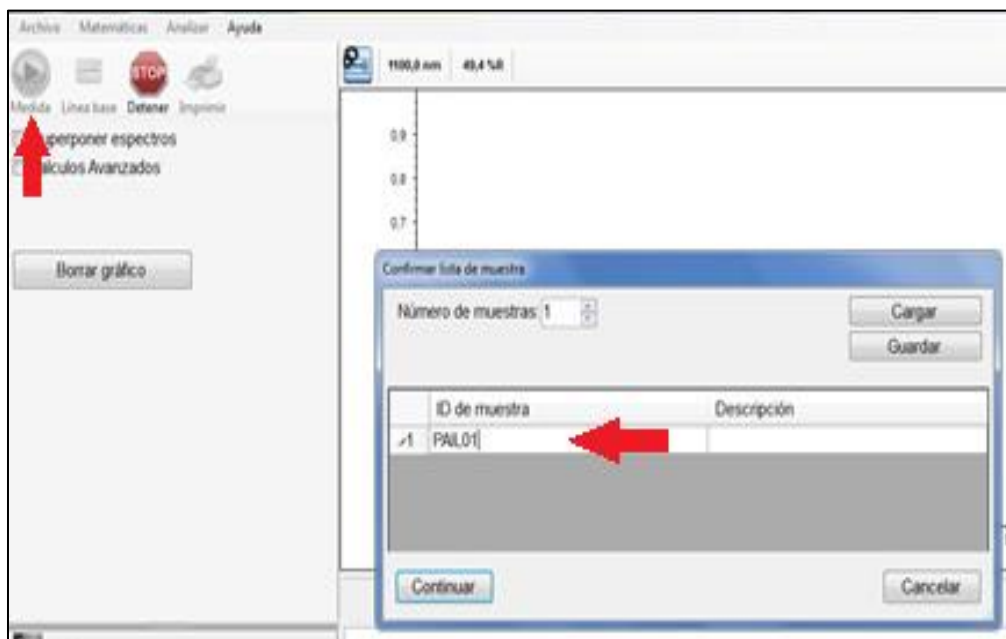


Figura 60. Medición e identificación de las muestras

Se presentan a continuación los espectros de reflectividad tomados por medio del espectrofotómetro siguiendo los pasos anteriores y los espectros de absorptividad realizados basados en la ecuación 8.

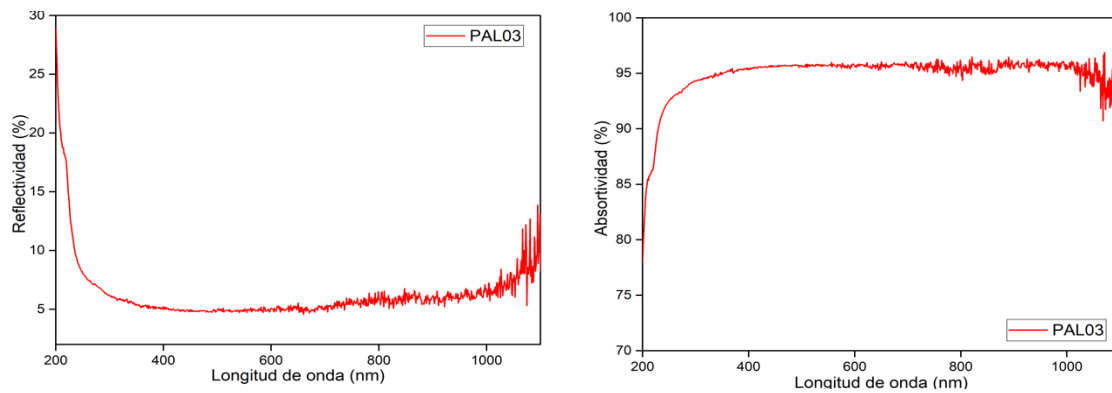


Figura 61. Espectro de reflectividad y absorptividad de la muestra PAL03 (Pintuco depositado sobre aluminio lijado 03)

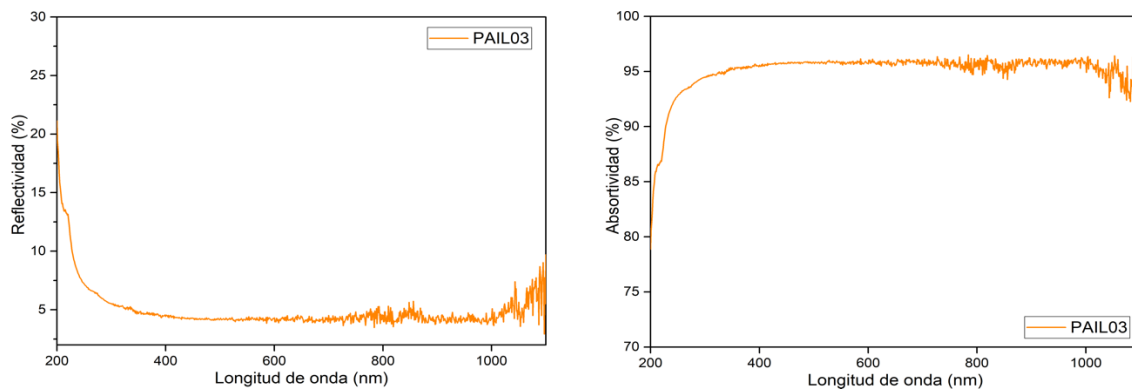


Figura 62. Espectro de reflectividad y absorptividad de la muestra PAIL03 (Pintuco depositado sobre acero inoxidable 304 lijado 03)

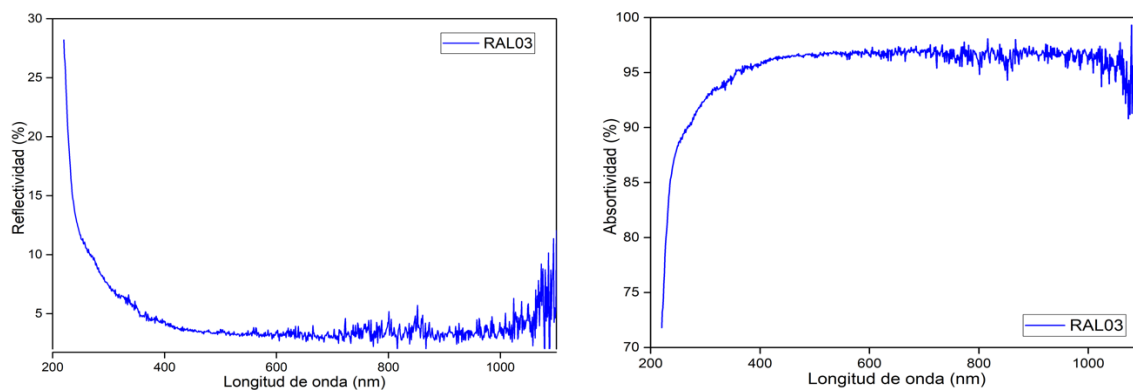


Figura 63. Espectro de reflectividad y absorptividad de la muestra RAL03 (Rust Oleum depositado sobre aluminio lijado 03)

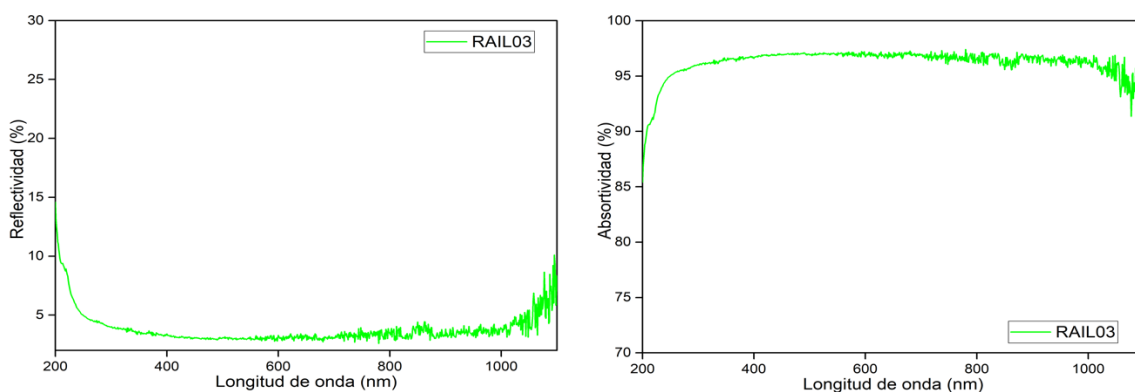


Figura 64. Espectro de reflectividad y absorptividad de la muestra RAIL03 (Rust Oleum depositado sobre acero inoxidable 304 lijado 03)

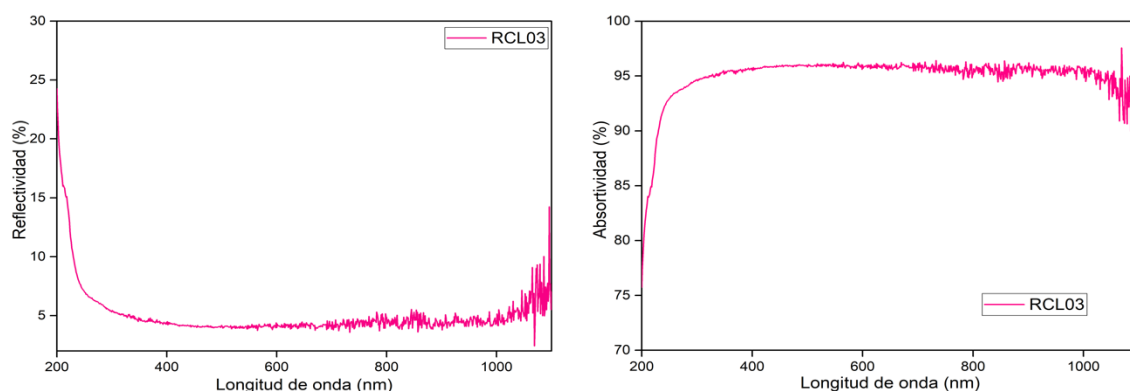


Figura 65. Espectro de reflectividad y absorptividad de la muestra RCL03 (Rust Oleum depositado sobre cobre lijado 03)

Los resultados del porcentaje de absorptividad en promedio se presentan en la Tabla 12, dividiendo el espectro en tres partes: intervalo ultravioleta (de 0 hasta 399 nm), intervalo solar (400nm hasta 700 nm) e intervalo infrarrojo cercano (de 701 hasta 1200 nm), tomados de cada uno de los espectros de absorptividad.

PORCENTAJE DE ABSORTIVIDAD			
	INTERVALOS		
	ULTRAVIOLETA	VISIBLE	INFRARROJO
PAL03 (Pintuco depositada sobre aluminio-03)	94%	96%	96%
PAIL03 (Pintuco depositada sobre acero inoxidable 304-03)	95%	95%	95%
RAL03 (Rust Oleum depositada sobre aluminio-03)	95%	96%	96%
RAIL03 (Rust Oleum depositada sobre acero inoxidable 304-03)	96%	97%	96%
RCL03 (Rust Oleum depositada sobre cobre-03)	95%	95%	95%

Tabla 12. Porcentajes de absorptividad de las pinturas comerciales de alta temperatura depositadas sobre aluminio, cobre y acero inoxidable 304 en el espectro electromagnético.

En la Figura 66 y Figura 67 se presenta una comparación de los espectros de reflectividad y absorptividad de los recubrimientos depositados sobre los tres sustratos metálicos utilizados, con el fin de poder visualizar los pequeños cambios de uno respecto al otro.

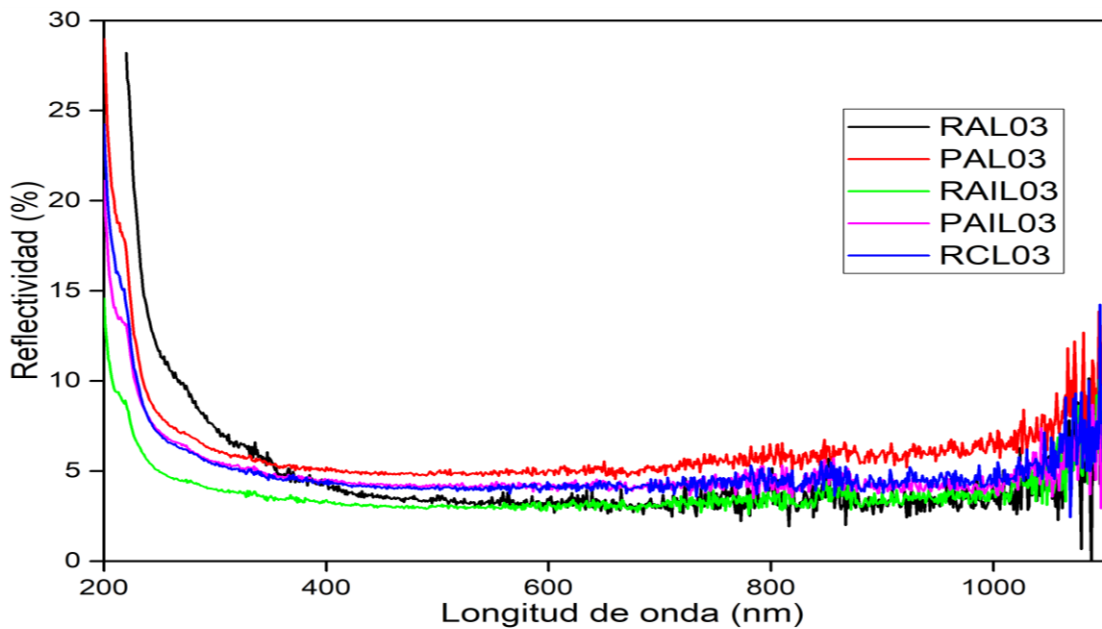


Figura 66. Comparación espectros de reflectividad de pinturas comerciales de alta temperatura depositadas sobre sustratos metálicos

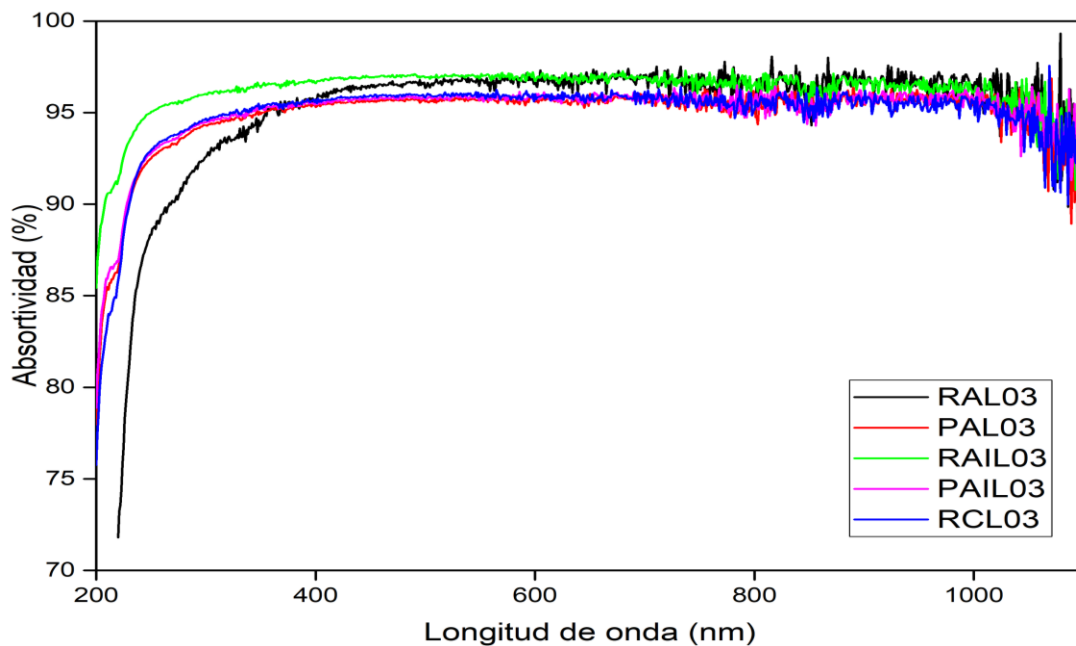


Figura 67. Comparación espectros de absorptividad de pinturas comerciales de alta temperatura depositadas sobre sustratos metálicos

En los espectros de absorptividad se puede apreciar que los recubrimientos tienden a comportarse de manera similar independiente del tipo de pintura y sustrato, es decir, todos los recubrimientos

tuvieron un comportamiento exponencial en la zona ultravioleta (hasta 399 nm) y comenzaron a estabilizarse en la zona visible (400 nm a 700 nm). En la zona ultravioleta se tiene que la muestra PAL03 obtuvo el porcentaje de absorptividad más bajo (94%) y la muestra RAIL03 fue la que presentó el porcentaje de absorptividad más alto con un valor de 96%. Sin embargo, la muestra PAL03 presentó una mejor estabilidad en la zona visible respecto a la muestra RAIL03, ya que esta muestra tuvo un porcentaje de absorptividad alto, pero tendía a disminuir cuando se acercaba a la zona del infrarrojo. Las muestras RCL03 y PAIL03 presentaron el mismo comportamiento a lo largo de todo valor de longitud de onda, las cuales obtuvieron un valor de porcentaje de absorptividad de 95% estable en todo el espectro. El porcentaje de absorptividad de la muestra RAL03 fue de 95% en el intervalo ultravioleta y 96% en el intervalo visible e infrarrojo cercano.

El comportamiento de una superficie selectiva es medido por el cociente entre la absorptividad y la emisividad térmica, propiedad que se conoce como selectividad [61]. En la Tabla 13 se presenta el valor de selectividad para cada uno de los recubrimientos depositados, teniendo en consideración que el valor de la absorptividad es en el espectro visible de las muestras depositadas de referencia terminadas en 03 y el valor de la emisividad térmica es el promedio de las mediciones realizadas en las diferentes temperaturas medidas en las muestras depositadas de referencia terminadas en 02. Como se comentó en el ítem de aplicación de los recubrimientos sobre los sustratos, se realizaron los depósitos de ambas pinturas bajo las mismas condiciones (distancia entre la boquilla de la pintura y sustrato (25 a 30 cm), número de capas depositadas (las cuales fueron tres). Por ende, las muestras de referencia terminadas 01, 02 y 03 son muestras similares entre sí.

RECUBRIMIENTO	ABSORPTIVIDAD (α)	EMISIVIDAD (ϵ)	SELECTIVIDAD (α/ϵ)
Pintuco depositada sobre aluminio	0.96	0.99	0.97
Pintuco depositada sobre acero inoxidable 304	0.95	0.99	0.96
Rust Oleum depositada sobre aluminio	0.96	0.99	0.97
Rust Oleum depositada sobre acero inoxidable 304	0.97	0.99	0.98
Rust Oleum depositada sobre cobre	0.95	0.99	0.96

Tabla 13. Comportamiento óptico de los recubrimientos depositados. Medición de la selectividad.

Basados en los resultados obtenidos en la Tabla 13, se obtuvo un valor de selectividad promedio de 0.97, esto implica que desde el punto de la caracterización óptica los recubrimientos tuvieron altos valores de absorptividad, sin embargo, los valores de emisividad térmica fueron altos también, por ende, las selectividades de los recubrimientos no fueron buenas, ya que para que sea una buena superficie selectiva se necesita de una baja emisividad térmica. Es por esto, que se buscó implementar alternativas para disminuir el valor de la emisividad. Una de las alternativas que se

implementó fue el uso de un diseño multicapa; los resultados obtenidos se presentan en la parte final del trabajo de investigación.

4.5. PRUEBAS DE DURABILIDAD EN CAMARA SALINA

Las pruebas de durabilidad se realizaron con fin de conocer el comportamiento ante la presencia de un ambiente de tipo salino o costero, y de esa manera medir el tiempo en que el recubrimiento tiene una estabilidad de las propiedades (saber si presenta algún deterioro o desgaste) y resistencia ante condiciones ambientales. En esta investigación los recubrimientos se sometieron a pruebas de durabilidad en una cámara salina con el fin de evaluar y estudiar el comportamiento en un ambiente químicamente activo. Se expusieron los recubrimientos a condiciones extremas en donde el material pudo deteriorarse debido a la corrosión. La cámara salina, creo un ambiente salino con humedades altas, y normalmente 35 °C , donde se expusieron los recubrimientos en el interior, a una niebla salina continua y corrosiva.

Los ensayos de durabilidad en cámara salina se rigieron basados en la norma NTC1156 ([62]). La cámara de niebla salina constaba de una cámara básica, una torre saturadora de aire, un depósito de solución salina, boquillas atomizadoras, soportes de las muestras, provisiones para calentar la cámara y controles para mantener la temperatura deseada (Figura 31), Se ingresaron 8 muestras en total.

Se reporta a continuación los valores medidos del espesor promedio de las muestras sometidas a cámara salina y se presenta la preparación de las muestras para ser expuestas ambiente corrosivo.

MEDICION DE ESPESORES MUESTRAS SOMETIDAS A CAMARA SALINA	
MUESTRAS	VALOR PROMEDIO ESPESORES (μm)
RAL03	16,5
PAL03	16,71
PAIL03	23,0
PAIL04	23,25
PAIL05	10,0
RAIL03	7,2
RAIL04	10,0
RAIL05	9,25

Tabla 14. Valor promedio de espesores de las muestras sometidas a cámara salina

La preparación de ingreso de las muestras fue la siguiente:

- Para las muestras PAL03 y RAL03 se tuvieron que cubrir los bordes con cinta aislante negra como se muestra en la Figura 68 para prevenir que la corrosión del ambiente salino ingresara por los bordes del sustrato de aluminio.
- Para las muestras PAIL03, PAIL04, PAIL05, RAIL03, PAIL04 y RAIL05 se cubrió con cinta negra solo uno de los extremos de cada muestra como se muestra en la Figura 69, para que se logaran sostener en el soporte de la cámara.



Figura 68. Preparación de las muestras depositadas sobre aluminio para ingreso a cámara salina



Figura 69. Preparación de las muestras depositadas sobre acero inoxidable 304 para ingreso a cámara salina

La posición de las muestras durante la exposición fue un factor importante a considerar, las muestras se sostuvieron entre 15° y 30° desde el plano vertical y paralelas a la dirección principal del flujo de niebla a través de la cámara. Además, las muestras no debían hacer contacto entre sí o con algún otro material metálico. Cada muestra se colocó de manera que permitiera un asentamiento libre de la niebla sobre todas las muestras y la solución salina de una muestra no debía gotear sobre cualquier otra muestra. La posición de las muestras se presenta en la Figura 70.

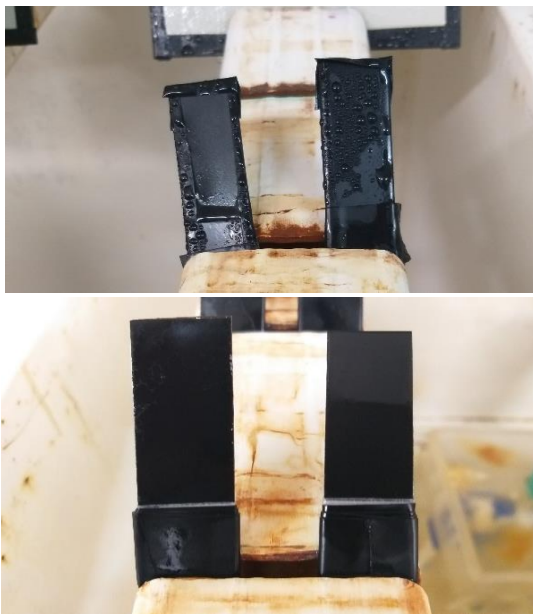


Figura 70. Posición de las muestras durante la exposición a cámara salina a un ángulo de 15° a 30° del plano vertical

Los parámetros de funcionamiento de la cámara salina se presentan en la siguiente tabla:

Temperatura	35 \pm 1.7°C
Suministro de aire	El suministro de aire comprimido a la boquilla o boquillas para atomizar la solución salina debía estar libre de aceite y suciedad y mantenerse entre 69 kPa/m ² y 172 kPa/m ² (10 psi y 25 psi).
Flujo de agua destilada	50 litros de agua con 2650 gramos de sal analítica. en promedio dura 5 días.
Sal	La sal utilizada fue cloruro de sodio sustancialmente libre de níquel y cobre y que contiene en la base seca no más de 0,1 % de yoduro de sodio y no más de 0,3 % de impurezas totales.

Tabla 15. Parámetros de funcionamiento cámara salina de la UTP

Fecha de ingreso: El tiempo transcurrido desde que se introdujeron las muestras hasta que comenzó el ataque de la corrosión, proporcionó una medida de la capacidad de resistencia de los recubrimientos a dicho ataque. Las muestras PAL03 y RAL03 ingresaron el día 18 de marzo a las 9 am y estuvieron en exposición a la niebla salina durante 120 horas. Las muestras PAIL03, PAIL04, PAIL05, RAIL03, RAIL04 y RAIL05 ingresaron el día 16 de septiembre a las 10:30 am y estuvieron en exposición a la niebla salina durante 960 horas. Se realizaron cortas interrupciones cada semana para inspeccionar si había ocurrido algún cambio en la superficie de las muestras.

Cuando se retiraron las muestras de la cámara salina se lavaron instantáneamente con agua para eliminar los depósitos de sal de su superficie y luego se secaron rápidamente. En la Figura 71 se visualizan las muestras antes de ser expuestas al ambiente salino y después de la limpieza y exposición al ambiente salino.

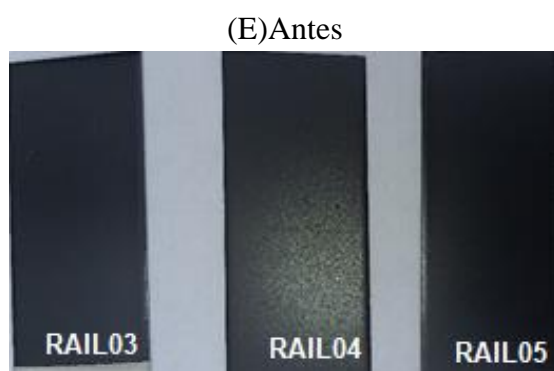
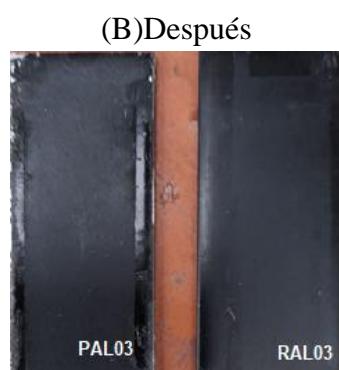
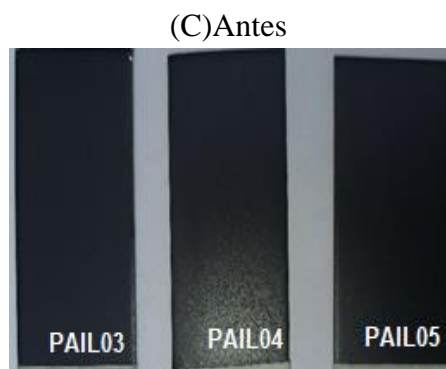


Figura 71. Muestras de pinturas depositadas sobre sustratos metálicos antes y después de ser sometidas a pruebas de durabilidad en cámara salina.

Se determinó visualmente el tipo y grado de distribución del óxido utilizando definiciones de la Tabla 16 y ejemplos visuales de la norma ASTM D610-08 [59].

Escala y descripción de las clasificaciones de oxidación				
Referencias visuales				
Grado de oxidación	Porcentaje de superficie oxidada	Spot(S)	General(G)	Pinpoint(P)
10	Menos o igual al 0.01 por ciento	None		
9	Mayor que 0.01 por ciento y hasta 0.03 por ciento	9-S	9-G	9-P
8	Mayor que 0.03 por ciento y hasta 0.1 por ciento	8-S	8-G	8-P
7	Mayor que 0.1 por ciento y hasta 0.3 por ciento	7-S	7-G	7-P
6	Mayor que 0.3 por ciento y hasta 1.0 por ciento	6-S	6-G	6-P
5	Mayor que 1.0 por ciento y hasta 3.0 por ciento	5-S	5-G	5-P
4	Mayor que 3.0 por ciento y hasta 10.0 por ciento	4-S	4-G	4-P
3	Mayor que 10.0 por ciento y hasta 16.0 por ciento	3-S	3-G	3-P
2	Mayor que 16.0 por ciento y hasta 33.0 por ciento	2-S	2-G	2-P
1	Mayor que 33.0 por ciento y hasta 50.0 por ciento	1-S	1-G	1-P
0	Más del 50 por ciento	None		
Tipos de distribución de óxido: Spot (S): Ocurre cuando la mayor parte de la oxidación se concentra en algunas áreas localizadas de la superficie pintada. General (G): Ocurre cuando se distribuyen al azar manchas de óxido de varios tamaños por la superficie. Pinpoint(P): Ocurre cuando el óxido se distribuye por la superficie como pequeñas motas individuales de óxido.				

Tabla 16. Grado y tipo de distribución de óxido, según la norma ASTM D610-08 [59]

Las muestras PAL03 y RAL03 presentaron un grado y tipo de distribución de 9-P, lo que significa que el porcentaje de oxidación fue mayor que 0.01 por ciento y menor a 0.03 por ciento y el óxido se distribuyó por la superficie en pequeños puntos separados. La capacidad de resistencia de los recubrimientos ante dicho ambiente durante las 120 horas de exposición fue alta, ya que no presentó un ataque corrosivo. Este resultado se puede confirmar mediante la comparación de la Figura 72, la cual es la gráfica de la norma ASTM D610-08 con respecto a la Figura 71B que se refiere a una imagen de las muestras después de ser expuestas a cámara salina.

Las muestras PAIL03, PAIL04 y PAIL05 que fueron depositadas con pintura Pintuco, sobre sustratos de acero inoxidable 304 y bajo las mismas condiciones presentaron un grado y tipo de distribución de 9-P, el porcentaje de oxidación de las muestras durante las 960 horas de exposición fue menor al 0.03 por ciento y solo se presentaron pequeños puntos de óxido separados sobre toda la superficie de los recubrimientos. Este resultado se puede confirmar mediante la comparación de la Figura 72 la cual hace referencia a la gráfica de la norma con respecto a la Figura 71D que se refiere a imagen de las muestras después de ser expuestas a cámara salina. En la Figura 71D se puede observar que la exposición de las muestras durante las 960 horas no presentó una alta oxidación, sin embargo, estos pequeños puntos de oxidación afectaron la adherencia del recubrimiento, formando parches de desprendimiento de la pintura.

Las muestras RAIL03, RAIL04 y RAIL05 que fueron depositadas con pintura Rust Oleum, sobre sustrato de acero inoxidable 304 y bajo las mismas condiciones presentaron también un grado y tipo de distribución de 9-P, los recubrimientos no fueron atacados altamente por la corrosión del ambiente salino, sin embargo, presentó una descamación de la pintura por los bordes de la pintura. Este resultado se puede confirmar mediante la comparación de la Figura 72, la cual hace referencia a la gráfica de la norma con respecto a la Figura 71F, que se refiere a imagen de las muestras después de ser expuestas a cámara salina.

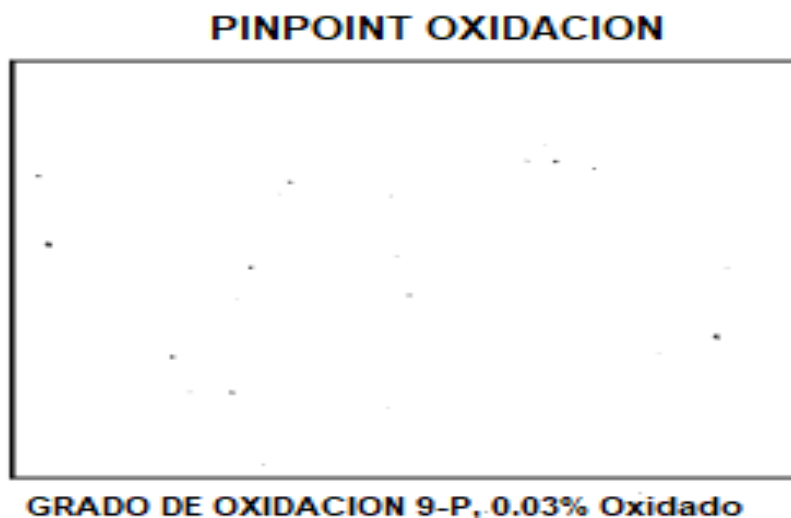


Figura 72. Comparación visual grado y tipo de distribución de oxidación.

Para comparar las propiedades mecánicas y ópticas de las muestras antes y después de ser sometidas a cámara salina, se realizan pruebas de adherencia, porcentaje de absortividad y emisividad térmica para saber si las propiedades de los recubrimientos cambiaron al ser atacados por un ambiente salino.

4.6. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN ÓPTICA Y MECÁNICA DE LAS MUESTRAS DESPUÉS DE SOMETERSE A PRUEBAS DE DURABILIDAD EN CÁMARA SALINA

4.6.1. ESPECTROS DE ABSORTIVIDAD

Se procedió a realizar los espectros de absorptividad para comparar el comportamiento óptico de las pinturas después de haber sido sometidas a cámara salina, ya que se deseaba saber si el porcentaje de absorptividad variaba ante el ataque de un ambiente de corrosión, como lo es el ambiente salino.

Se presentan a continuación una comparación de los espectros de absorptividad de cada una de las muestras antes y después de ser sometidas a cámara salina. Y en la Tabla 17 la comparación de resultados obtenidos de los valores del porcentaje de absorptividad en promedio en el intervalo ultravioleta, visible e infrarrojo cercano antes y después de ser sometidas las muestras a cámara salina.

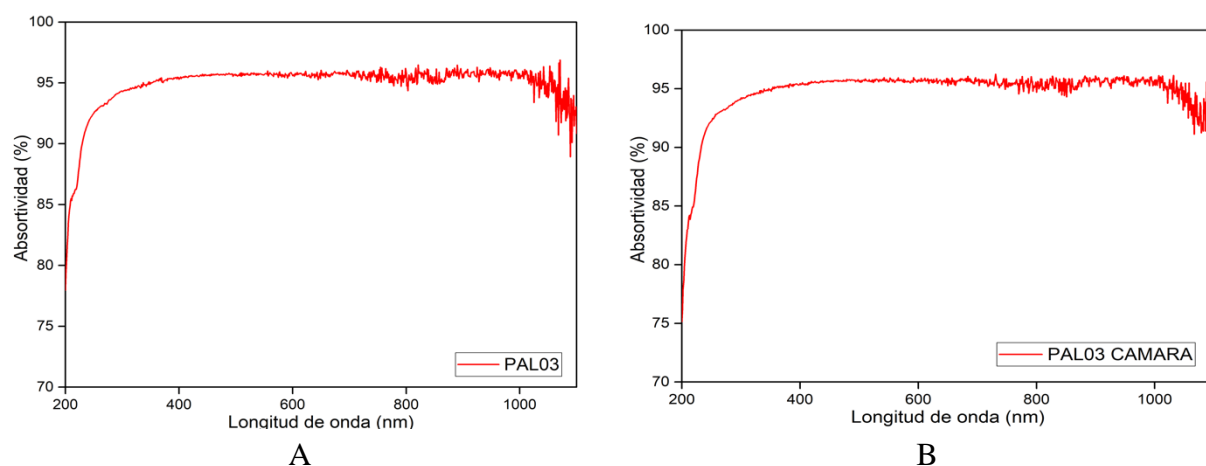


Figura 73. Comparación espectros de absorptividad de la muestra PAL03, en A antes y en B, después de ser sometida a cámara salina.

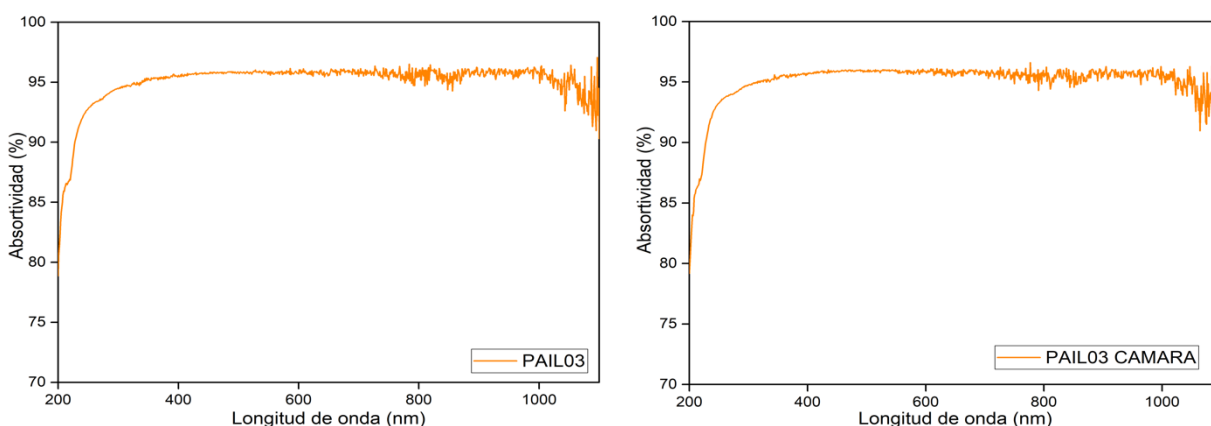


Figura 74. Comparación espectros de absorptividad de la muestra PAIL03, en A antes y en B después de ser sometida a cámara salina

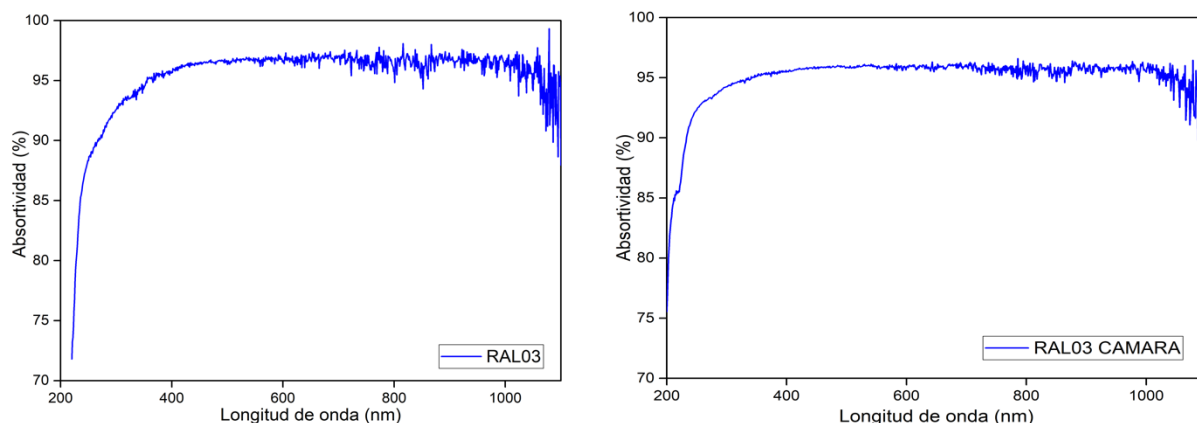


Figura 75. Comparación espectros de absortividad de la muestra RAL03, en A antes y en B después de ser sometida a cámara salina

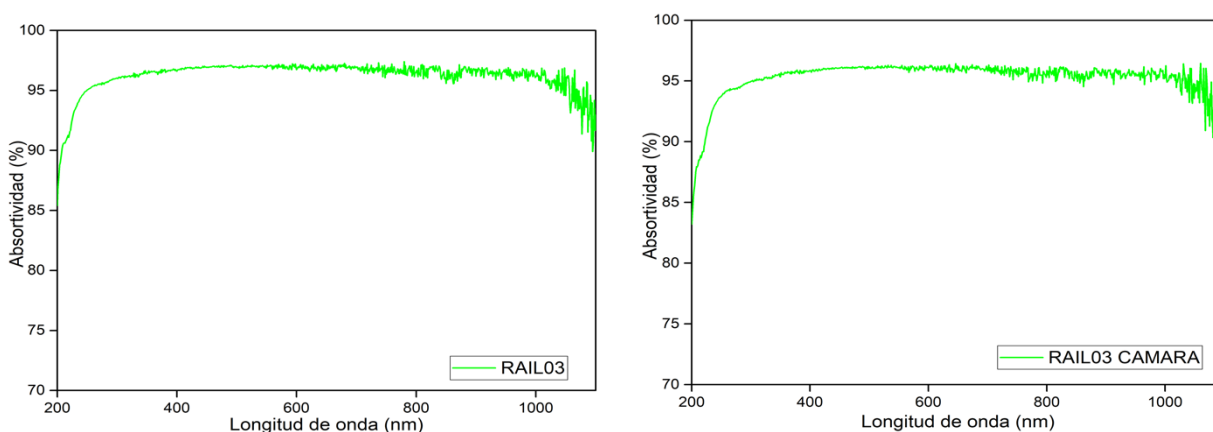


Figura 76. Comparación espectros de absortividad de la muestra RAIL03, en A antes y en B después de ser sometida a cámara salina

Estas comparaciones se han resumido en la Tabla 17.

COMPARACION DEL PORCENTAJE DE ABSORTIVIDAD ANTES DE CÁMARA SALINA Y DESPUÉS DE CÁMARA SALINA						
Tiempo de exposición en cámara salina						
PAL03→120 horas RAL03→120 horas PAIL03→960 horas RAIL03→960 horas						
Intervalo Muestra	Ultravioleta		Visible		Infrarrojo	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
PAL03	94%	94%	96%	95%	96%	95%
PAIL03	95%	95%	95%	95%	95%	95%
RAL03	95%	95%	96%	95%	96%	96%
RAIL03	96%	95%	97%	95%	96%	95%

Tabla 17. Comparación valores del porcentaje de absortividad en el espectro electromagnético

Los recubrimientos sometidos a pruebas de durabilidad en cámara salina lograron mantener un porcentaje de absorptividad mayor a 95% en las zonas ultravioleta, visible e infrarrojo cercano. Basados en los resultados obtenidos se tiene que la muestra PAL03 disminuyó en un 1% su porcentaje de absorptividad en la zona visible e infrarrojo. La muestra PAIL03 no tuvo ninguna variación en ninguna de las zonas del espectro. La muestra RAL03 mantuvo el mismo porcentaje de absorptividad en la zona ultravioleta e infrarrojo (95%) y presentó una disminución del 1% en la zona visible. La muestra RAIL03 fue la que más presentó cambios, teniendo una disminución del 1% en la zona ultravioleta e infrarrojo y una disminución del 2% en la zona visible.

Se concluye que las propiedades de absorptividad de las muestras no presentaron cambios después del sometimiento al ataque de corrosión. Ambas pinturas presentaron un porcentaje de absorptividad mayor a 95%, cumpliendo con una de las propiedades importantes (alta absorptividad) para implementarse como capa absorbidora en un colector solar plano.

4.6.2. EMISIVIDAD TÉRMICA

Se realizó la medición de emisividad térmica sobre las muestras sometidas a pruebas de cámara salina. Se presentan en la Tabla 18, los valores de emisividad térmica antes y después de cámara salina, con el fin de realizar una comparación de los resultados obtenidos.

EMISIVIDAD TERMICA								
	MUESTRAS							
Temperatura (°C)	PAL03		RAL03		PAIL04		RAIL04	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
100	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
150	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
205	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
Emisividad Promedio	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99

Tabla 18. Valor de emisividad térmica tomada para todos los recubrimientos antes y después de ser sometidas a cámara salina

Las muestras PAL03, RAL03, PAIL04 y RAIL04 que se sometieron a pruebas en cámara salina dieron como resultado una emisividad promedio de 0.99. Los recubrimientos no presentaron ningún cambio con respecto al valor promedio de las muestras antes de la exposición, es decir, las pinturas se siguieron comportando semejante a un cuerpo negro con emisividad muy alta.

4.6.3. ADHERENCIA

Se realizaron pruebas de adherencia a las muestras que se sometieron a pruebas de cámara salina, basados en la norma ASTM D3359 [54], con el fin de saber que tan adherente seguía siendo el

material después de haber sido sometido a un ataque de corrosión y realizar una comparación de los recubrimientos con respecto a las pruebas de adherencia que se realizaron antes de someter las pruebas en cámara salina. Los resultados se presentan en la Tabla 19.

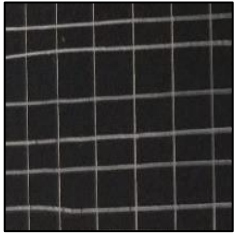
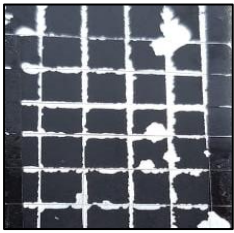
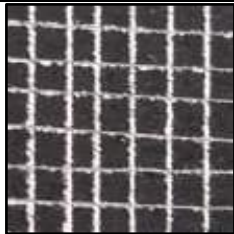
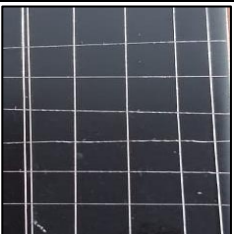
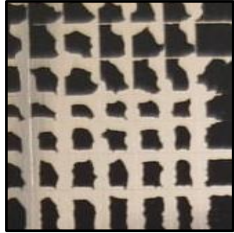
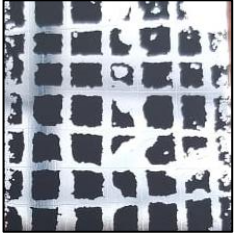


Muestra	Fotografía prueba de adherencia antes de cámara salina	Evaluación	Muestra	Fotografía prueba de adherencia después de cámara salina	Evaluación
PAL01		5B	PAL04		2B
RAL01		5B	RAL04		5B
PAIL01		2B	PAIL04		1B
RAIL01		5B	RAIL04		5B

Tabla 19. Resultados y comparación de las pruebas de adherencia antes y después de someter las muestras a cámara salina

La muestra PAL01 pasó de tener una clasificación de adherencia de 5B (antes de ser sometidas a pruebas en ambiente salino) a una clasificación de 2B, lo que significa que el recubrimiento tuvo escamas y pequeños desprendimientos a lo largo de los bordes y en partes de los cuadrados; el área afectada fue un 35% de área total pintada. La muestra PAIL04 presentó la más baja adherencia, con un porcentaje de área removida de 60%, dando como resultado una clasificación de adherencia de 1B. Las muestras PAL01 y RAIL01 no presentaron ningún cambio en la clasificación, es decir,

la pintura Rust Oleum siguió presentando una excelente adherencia al sustrato de aluminio y acero inoxidable 304 con una clasificación de 5B.

4.7. PRUEBAS DE DURABILIDAD DE INTEMPERISMO NATURAL.

Se sometieron muestras de las dos pinturas depositadas sobre sustratos de aluminio, cobre y acero inoxidable a factores naturales como la radiación UV, la salinidad, temperatura, humedad y la acidez del ambiente en la terraza del edificio Santa Marta de la ciudad de Pereira. Dichas muestras estarán expuestas mínimo 1 año, por tal motivo, aún no se presentan resultados. En la Figura 77 se presentan las muestras expuestas.



Figura 77. Muestras sometidas a Intemperismo natural en la ciudad de Pereira

4.8. APLICACIÓN DE UN DISEÑO MULTICAPA PARA REDUCIR LA EMISIVIDAD TÉRMICA

En busca de disminuir la alta emisividad térmica que entregaron las muestras de las pinturas de alta temperatura (sin tener que disminuir la alta absorptividad), se realizaron cuatro depósitos multicapas de cuatro tipos de películas delgadas de diferentes compuestos por medio del método sol-gel como primera capa y como segunda capa se depositó una capa delgada de la pintura Rust Oleum, ya que esta pintura soporta hasta 650 °C de temperatura.

El proceso de sol-gel se ha propuesto como un método para sintetizar materiales orgánicos e inorgánicos a partir de precursores solubles que otorgan propiedades específicas de acuerdo con la aplicación. En general, la estequiometría requerida en este proceso permite la mezcla de especies metálicas que disueltas en un medio líquido aumentan su viscosidad formando un revestimiento sólido. El depósito de Sol-gel no dependen de sistemas de vacío, y permiten el uso de reactivos con mayor libertad, lo que en efecto reduce la dependencia de precursores caros o sensibles. Este tipo

de depósitos reducen los costos de producción además de ser versátiles a la hora de cubrir diferentes tipos de superficies [63].

El procedimiento del depósito multicapa se realizó de acuerdo con los siguientes pasos:

Primero, se prepararon cuatro muestras de cuatro diferentes aleaciones y relación molar por el método de inmersión (Sol-gel), bajo condiciones fijas de velocidad de depósito y número de capas. Las muestras se trataron térmicamente a una temperatura de recocido de 500°C durante 12 horas a una rampa de 1 °C/min. Los compuestos y la descripción de los depósitos se presentan en la Tabla 20 y en la Figura 78 se presentan los recubrimientos de las diferentes aleaciones.

Nombre de las muestras	Tipo de sustrato	Composición/aleación [R.M 0.03:0.01:0.03]	Clasificación	Temperatura calcinada [°C] / Tasa de calentamiento [°C/min]
AC_EXP1_2_5	Acero inoxidable304	Cu(acac):Co:Mn	Etapa 2	500 / 1
AC_EXP3_2_4	Acero inoxidable304	Cr(acac):Co:Mn	Etapa 2	500 / 1
AC_EXP5_2_6	Acero inoxidable304	Ni:Co:Mn	Etapa 2	500 / 1
AC_EXP6_2_4	Acero inoxidable304	Ag:Co:Mn	Etapa 2	500 / 1
<p>Donde:</p> <p>R.M=Relación molar</p> <p>Nombre de las muestras = Sustrato + Experimento + Clasificación + Numeración</p> <p>Etapa 2= Se trabajaron soluciones Sol-gel con partículas de plata (otorgadas por el bactericida) con el objetivo de observar las variaciones en las propiedades ópticas.</p> <p>Acac= Acetilacetato</p>				
<p>Todas las muestras fueron depositadas bajo las mismas condiciones:</p> <p>*Número de capas = 2</p> <p>*Tiempo de depósito [min]= 5</p>				

Tabla 20. Descripción de las muestras depositadas por el método de sol gel

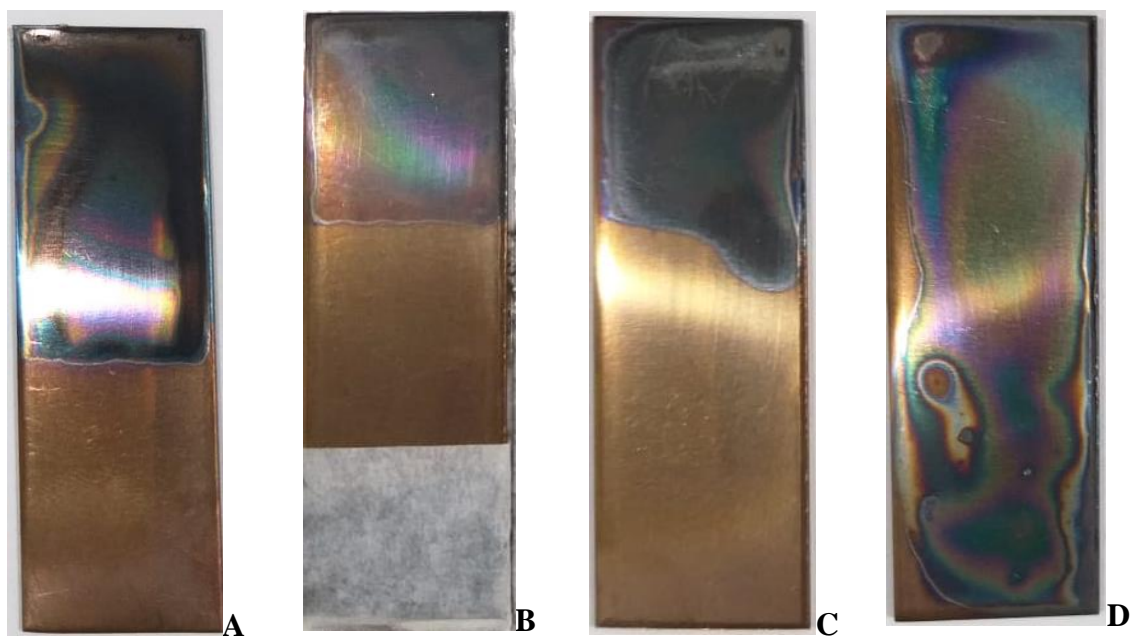


Figura 78. Recubrimientos depositados por el método de inmersión (sol gel). (A)EXP1.2.5 (B)EXP3.2.4 (C)EXP5.2.6 (D)EXP6.2.4

El segundo paso fue depositar una capa delgada de pintura Rust Oleum (16 μm aproximadamente de espesor) sobre las cuatro muestras que fueron depositadas previamente por sol-gel. Se presentan en la Figura 79 los recubrimientos finales al realizarse el depósito multicapa.

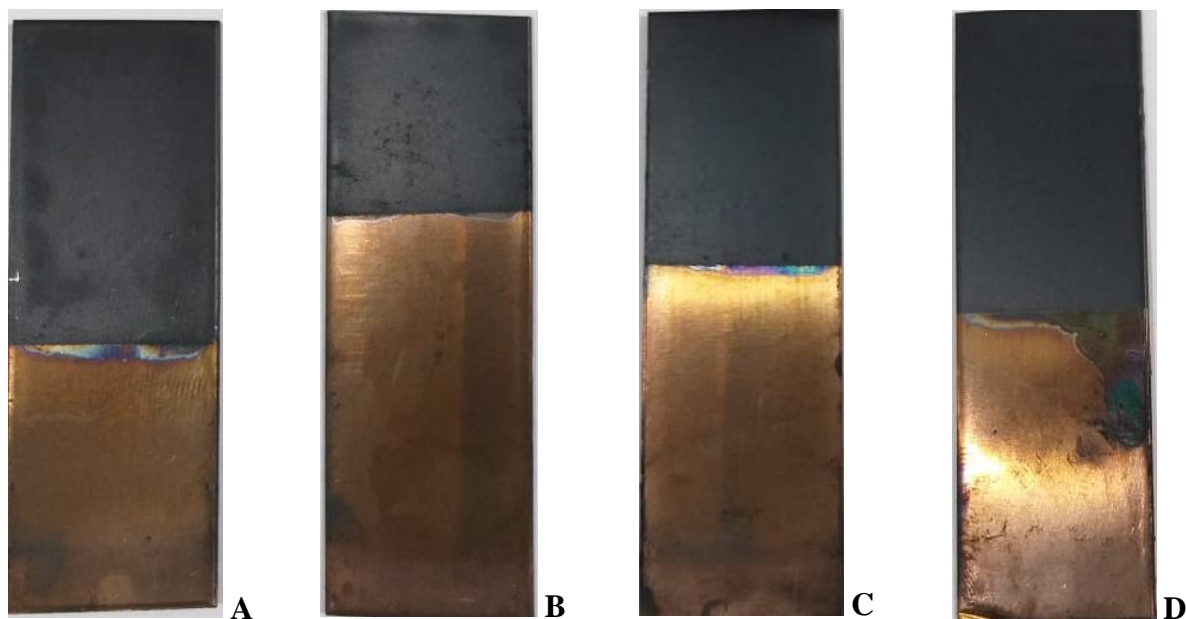


Figura 79, Recubrimientos multicapas. (A)EXP1.2.5_RustOleum (B)EXP3.2.4_RustOleum (C)EXP5.2.6_RustOleum (D)EXP6.2.4_RustOleum

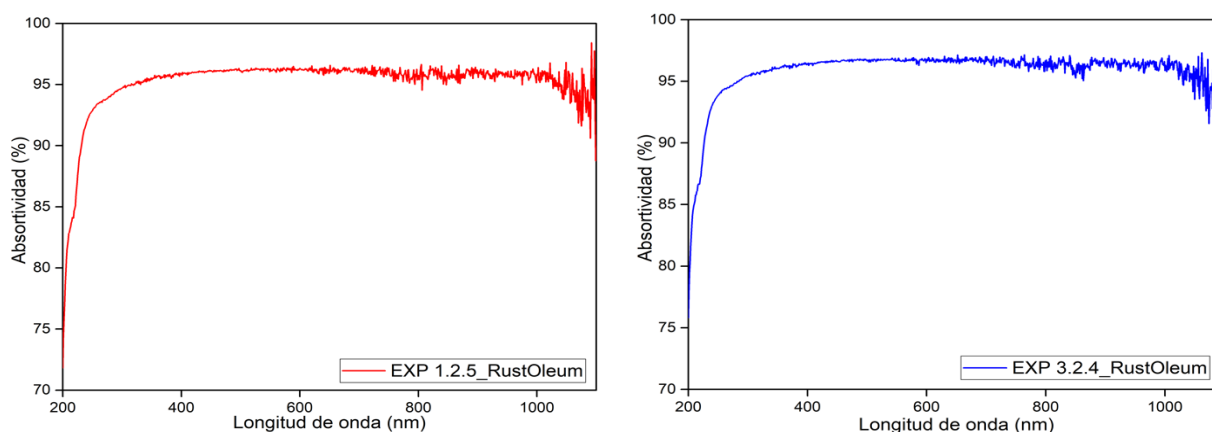
En la Tabla 21 se reportan los valores de la medición de la emisividad térmica para cada una de las muestras depositadas por el método sol-gel antes de depositar la capa de la pintura Rust Oleum, con el fin de conocer si estos depósitos tenían un alta ($\varepsilon > 0.8$) o baja ($\varepsilon < 0.3$) capacidad de emitir energía infrarroja.

EMISIVIDAD TERMICA				Valor emisividad promedio
Muestra	Temperaturas de medición			
	160°C	190°C	218°C	
AC_EXP1_2_5	0,15	0,16	0,17	0,16
AC_EXP3_2_4	0,18	0,17	0,17	0,17
AC_EXP5_2_6	0,13	0,14	0,17	0,14
AC_EXP6_2_4	0,11	0,19	0,18	0,16

Tabla 21. Valores medición de emisividad muestras depositadas por el método sol-gel

Se puede apreciar que los cuatro recubrimientos cuentan con un valor de emisividad térmica muy bajo ($\varepsilon < 0.2$).

Se presentan a continuación, tanto en la Figura 80 y en la Tabla 22 y Tabla 23 los resultados de la medición de las propiedades ópticas (porcentaje de absortividad y emisividad térmica) de las muestras ya siendo recubrimientos de multicapas, con el fin de comparar los resultados obtenidos con los medidos en las muestras sin depósito de sol-gel y saber si el valor de la emisividad térmica disminuyó.



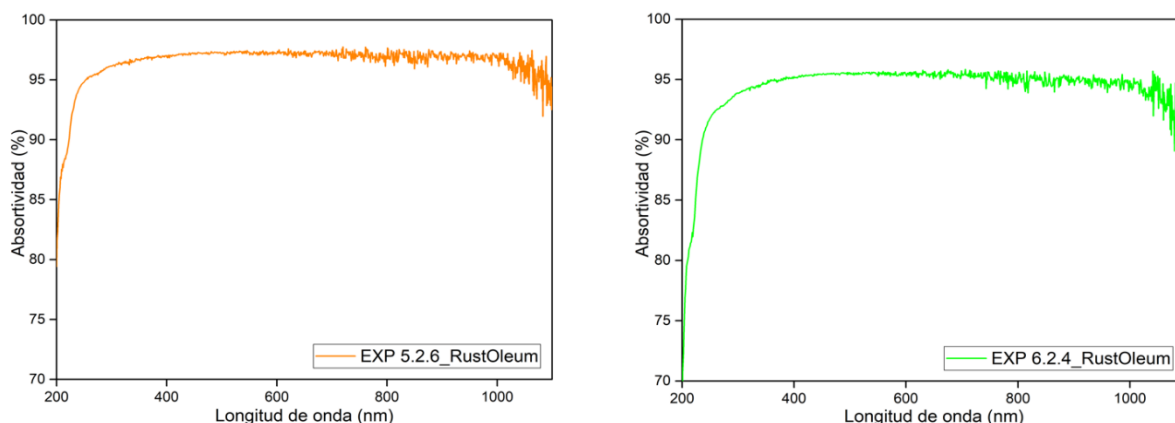


Figura 80. Espectros de absorptividad muestras depositadas en multicapas

PORCENTAJE DE ABSORTIVIDAD MUESTRAS DEPOSITAS EN MULTICAPA			
Intervalo Muestra	ULTRAVIOLETA	VISIBLE	INFRARROJO
EXP1_2_5_RustOleum	95%	96%	95%
EXP3_2_4_RustOleum	95%	96%	96%
EXP6_2_4_RustOleum	94%	95%	94%
EXP5_2_4_RustOleum	96%	97%	96%

Tabla 22. Valores del porcentaje de absorptividad de las muestras depositadas en multicapas en el espectro electromagnético

EMISIVIDAD TERMICA				Valor emisividad térmica promedio
Muestra	Temperaturas de medición			
	160 °C	190 °C	218 °C	
AC_EXP1_2_5_RustOleum	0,99	0,99	0,99	0,99
AC_EXP3_2_4_RustOleum	0,99	0,99	0,99	0,99
AC_EXP5_2_6_RustOleum	0,99	0,99	0,99	0,99
AC_EXP6_2_4_RustOleum	0,99	0,99	0,99	0,99

Tabla 23. Valores medición de la emisividad de las muestras depositadas en multicapas

Se puede visualizar en la Tabla 22 que las muestras depositadas en multicapas presentaron un porcentaje de absorptividad superior a 95%, dando como resultado muy buenas propiedades de absorptividad, sin embargo, ya que el propósito de los depósitos multicapas era, no solo mantener una alta absorptividad sino disminuir el valor de la emisividad térmica, entonces basados en los resultados obtenidos en la Tabla 23 se puede observar que la aplicación del depósito multicapa no tuvo efecto en la disminución de la emisividad térmica de la pintura, dando como resultado un valor de emisividad de 0.99, semejante al valor que se obtuvo sin la aplicación de los recubrimientos depositados por sol-gel. Se concluye que los depósitos realizados por sol-gel de las diferentes aleaciones no tuvieron impacto en la disminución de la emisividad térmica de la pintura Rust Oleum.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES

- Las pinturas Pintuco y Rust Oleum presentaron altos porcentaje de absorptividad superiores al 95%, sin embargo, ambas pinturas también presentaron una emisividad térmica muy alta con un valor promedio de 0,99, ya que se al ser pinturas negras y de terminado mate se tienden a comportar como un cuerpo negro.
- Se intentó disminuir el valor de la emisividad térmica de la pintura Rust Oleum por medio de un depósito multicapa. Se realizaron cuatros muestras cada una con diferente composición (Cu(acac):Co:Mn, Cr(acac):Co:Mn, Ni:Co:Mn, Ni:Co:Mn) depositas por el método de inmersión sol-gel, ya que dichas muestras presentaron valores de emisividad térmica menores a 0,2 y se depositó por encima de las cuatro muestras una capa delgada de la pintura Rust Oleum. Los resultados ópticos mostraron que los depósitos realizados por sol-gel para el diseño multicapa, no tuvieron impacto en la disminución de la emisividad térmica de la pintura Rust Oleum, ya que se obtuvieron los mismos resultados de porcentaje de absorptividad (96%) y de emisividad térmica (0,99).
- Las muestras de la pintura Pintuco y de la pintura Rust Oleum depositadas sobre acero inoxidable 304 y sobre aluminio y sometidas a pruebas de durabilidad en una cámara salina, presentaron un grado y tipo de distribución de 9-P, es decir, ninguno de los recubrimientos expuestos fue atacado por la corrosión del ambiente salino. Sin embargo, hubo variaciones en la adherencia en las muestras depositadas sobre acero inoxidable 304 de la pintura Pintuco, ya que presentaron pequeños desprendimientos sobre la superficie.
- El porcentaje de absorptividad promedio de la pintura Pintuco depositada sobre aluminio, después de la exposición en cámara salina durante 120 horas, tuvo una disminución del 1% en el intervalo visible e infrarrojo y en el intervalo ultravioleta no se generaron variaciones. La pintura Pintuco depositada sobre acero inoxidable 304 presentó un porcentaje de absorptividad de 95% en todo el espectro UV visible, antes y después de la exposición a cámara salina durante 960 horas. La pintura Rust Oleum depositada sobre aluminio y expuesta a cámara salina durante 120 horas presentó un porcentaje de absorptividad de 95% en el intervalo ultravioleta, 96% en el intervalo infrarrojo antes y después de la exposición a cámara salina durante 120 horas y una disminución de 1% en el intervalo visible después de la exposición, dando como resultado un porcentaje de absorptividad promedio final de 95%. La pintura Rust Oleum depositada sobre acero inoxidable 304 fue la que presentó el mejor porcentaje de absorptividad antes de la exposición en la cámara salina, con un porcentaje de hasta 97% en el intervalo visible y 96% en el intervalo ultravioleta e infrarrojo. Sin embargo, después de la exposición en la cámara salina durante 960 hora tuvo una disminución del 1% en el intervalo ultravioleta e infrarrojo y un 2% en el intervalo visible. Se concluye que todas muestras en general tuvieron un excelente comportamiento

de absorptividad antes y después del ataque corrosivo, presentando un porcentaje de absorptividad promedio de 95% para todo el espectro UV-visible.

- La pintura Rust Oleum depositada sobre los sustratos de aluminio y acero inoxidable 304 presentó la mejor adherencia con una clasificación de 5B antes y después de someterlas a cámara salina. La pintura Pintuco no tuvo una buena adherencia en sustratos de cobre, ya que se desprendió en más de 65% de la pintura depositada y en los sustratos de aluminio y acero inoxidable presentó una clasificación de 2B y 1B respectivamente, después de la exposición al ambiente salino, dando como resultado un porcentaje de área removida del 35-60%.

Con los resultados obtenidos y haciendo una comparación entre la pintura Pintuco y Rust Oleum se concluye que la pintura Rust Oleum presenta mejores propiedades ópticas, mecánicas y de durabilidad y el mejor sustrato para depositarla es el aluminio, seguido del acero inoxidable 304 y por último el cobre.

CONSIDERACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

- Se considera necesario realizar más experimentos con el depósito multicapa, con el fin de disminuir la emisividad térmica de las pinturas, variando el orden de depósito, es decir, utilizar primero una capa de la pintura Rust Oleum y como segunda capa los recubrimientos depositados por el método sol-gel que presentaron emisividades menores a 0.2 y absorptividades del orden del 95%.
- Sería importante poder realizar experimentos que permitan determinar un espesor o un intervalo óptimos de depósito de las pinturas, particularmente de la pintura Rust Oleum, aunque por el bajo costo de la pintura, este aspecto no representa un elemento primario.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. L. Trejos Moncada, Estudio experimental comparativo de las propiedades ópticas y mecánicas de superficies de captación solar (tesis de pregrado)., Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2014.
- [2] M. J. Santelis Carbajal, Estudio experimental comparativo de propiedades ópticas y mecánicas de absorbedores solares, utilizando recubrimientos de alta absortividad y baja emisividad a base de pinturas comerciales sobre superficies metálicas (tesis de pregrado)., Ciudad de Mexico: Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad azcapotzalco, 2016.
- [3] S. Cortes y A. Arango Londoño, «Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía,» Ciencias Estratégicas, vol. 25, n° 38, pp. 375-390, 2017.
- [4] E. D. Foster S, «El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible>. . [Último acceso: 14 Septiembre 2020].
- [5] «Combustibles fosiles,» [En línea]. Available: <https://www.rjconsultores.es/combustibles-fosiles/>. [Último acceso: 15 Septiembre 2020].
- [6] «Impacto ambiental del uso de combustibles fósiles.,» [En línea]. Available: <https://energiciteconnatalia.wordpress.com/combustibles-fosiles/impacto-ambiental-del-uso-de-los-combustibles-fosiles/>. [Último acceso: 23 Septiembre 2020].
- [7] «Las energías renovables y su relación con el cambio climático.,» [En línea]. Available: <https://www.fiiapp.org/las-energias-renovables-y-su-relacion-con-el-cambio-climatico/>. [Último acceso: 14 Septiembre 2020].
- [8] «Energías renovables: características, tipos y nuevos retos.,» [En línea]. Available: <https://www.factorenergia.com/es/blog/noticias/energias-renovables-caracteristicas-tipos-nuevos-retos/>. [Último acceso: 30 Agosto 2019].
- [9] «Energía renovable,» [En línea]. Available: <https://economipedia.com/definiciones/energia-renovable.html>. [Último acceso: 22 Septiembre 2020].
- [10] «Colector solar de placa plana,» [En línea]. Available: https://es.onosisolar.com/flat-plate-solar-collector_supply14.html. [Último acceso: 15 Noviembre 2020].
- [11] «Energía solar,» [En línea]. Available: <https://www.accionacom.es/energias-renovables/energia-solar/>.. [Último acceso: 24 Septiembre 2020].

- [12] «Conoce más acerca de la energía solar.,» [En línea]. Available: <https://cesienergy.com/2020/02/03/conoce-mas-acerca-de-la-energia-solar/>. [Último acceso: 23 Septiembre 2020].
- [13] «Como se obtiene la energia solar,» [En línea]. Available: <https://atersa.shop/como-se-obtiene-la-energia-solar/>. [Último acceso: 24 Septiembre 2020].
- [14] «Energia solar termica,» [En línea]. Available: <http://www.ecoinnova.com.ar/calefaccion-sanitaria.php>. [Último acceso: 26 Septiembre 2020].
- [15] «Multiples aplicaciones con energia solar,» [En línea]. Available: <http://www.ecoinnova.com.ar/calefaccion-sanitaria.php>. [Último acceso: 26 Septiembre 2020].
- [16] «Todo lo que debes saber sobre energía solar en Colombia,» Celsia, [En línea]. Available: <https://eficienciaenergetica.celsia.com/todo-lo-que-debes-saber-sobre-energia-solar-en-colombia/>. [Último acceso: 26 Septiembre 2020].
- [17] «Con Celsia Solar Yumbo, Colombia cumple un año generando energía renovable a gran escala,» [En línea]. Available: https://www.celsia.com/en/sala_de_prensa/con-celsia-solar-yumbo-colombia-cumple-un-ano-generando-energia-renovable-a-gran-escala/. [Último acceso: 28 Septiembre 2020].
- [18] «Proyectos solar termica,» [En línea]. Available: <https://ecossol.co/ecossol/index.php/nuestros-proyectos/sola-termica>. [Último acceso: 28 Septiembre 2020].
- [19] «Universidad emplea energía solar para calentar piscinas.,» 28 Octubre 2019. [En línea]. Available: <https://noticiasncc.com/recomendacion-semanal/10/28/universidad-emplea-energia-solar-climatizar-piscinas/>. [Último acceso: 07 Octubre 2020].
- [20] «Tipos de celdas solares,» [En línea]. Available: <http://www.sde.mx/tipos-de-celdas-solares/>. [Último acceso: 29 Septiembre 2020].
- [21] M. K. Gunde y Z. C. Orel, Optical characterization and modeling of black pigments used in thickness sensitive solar selective absorbing paints..
- [22] C. Lasorsa, N. Di Lalla, P. Perillo y P. Morando , Elaboracion mediante PECVD de películas de TiO₂ para uso en fotocatalisis, Villa del mar: 12° Congreso Binacional de Metalurgia y Materiales, 2012.
- [23] Tinox Energía. Recubrimientos Absorbentes. Información técnica. Almeco Tinox, 2009.

- [24] «What Is TiNOX Solar Thermal Technology Made Of?», [En línea]. Available: <https://www.sunmaxxsolar.com/product-info/flat-plate-solar-collectors/>. [Último acceso: 08 Octubre 2020].
- [25] Eficiencia. Solar. Superficie. Información técnica Alanod solar. Como imagen / ESP, 2019.
- [26] NMX-ES-001-NORMEX 2005. Rendimiento térmico y Funcionalidad de Colectores solares.
- [27] L. Wua, J. Gaoa, Z. Liua, L. Lianga y F. Xiab, «Características de envejecimiento térmico de recubrimiento absorbente selectivo solar CrNxOy para aplicaciones para colectores térmicos solares de placa plana.,» de Materiales de Energía Solar y Células Solares,, 2013, pp. 186-191.
- [28] E. AlShamaileh, «Las pruebas de un nuevo revestimiento solar para aplicaciones de calentamiento solar de agua.,» de Energía solar, Volumen 84, 2010, pp. 1637-1643.
- [29] «Vantablack S-VIS el recubrimiento más oscuro creado por el hombre ahora en spray.,» 11 Marzo 2016. [En línea]. Available: <https://www.arquired.com.mx/tecnologia/vantablack-s-vis-recubrimiento-oscuro-creado-hombre-ahora-en-spray/>. [Último acceso: 30 Agosto 2019].
- [30] «Que es un sistema solar fotovoltaico,» [En línea]. Available: <http://www.sde.mx/que-es-un-sistema-fotovoltaico/>. [Último acceso: 8 octubre 2020].
- [31] «Sistemas fotovoltaicos interconectados a la red,» [En línea]. Available: <http://www.gruposolarmex.com/10-productos-y-servicios/17-sistemas-fotovoltaicos-interconectados-a-la-red>. [Último acceso: 09 Noviembre 2020].
- [32] J. C. P. Gutiérrez, Energía Solar “colectores solares planos” tratamiento Teórico vol.1, Chihuahua, México : Universidad Autónoma De Ciudad de Juárez, 2006.
- [33] «Colector solar plano,» [En línea]. Available: <https://solar-energia.net/energia-solar-termica/colector-solar-termico/colector-solar-plano>. [Último acceso: 9 octubre 2020].
- [34] D. Saura, «Análisis numérico de los fenómenos de convección mixta en colectores solares planos de tipo serpentín,» Cartagena, 2013, p. 10.
- [35] «Tipos de colectores solares termicos,» [En línea]. Available: <http://www.termasolar.com/2011/06/3-tipos-de-colectores-solares-termicos.html>. [Último acceso: 9 octubre 2020].

- [36] «Colector solar plano x2,» [En línea]. Available: <http://www.energiasolar.lat/colector-solar-plano/>. [Último acceso: 9 octubre 2020].
- [37] «Radiacion solar,» [En línea]. Available: [http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar-ultravioleta#:~:text=Figura%201.,200%20nm%20a%203.000%20nm\)..](http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar-ultravioleta#:~:text=Figura%201.,200%20nm%20a%203.000%20nm)..). [Último acceso: 09 Noviembre 2020].
- [38] «Solar Thermal 101: Flat Plate Solar Collectors,» solar fred, 13 abril 2010. [En línea]. Available: <http://www.freehotwater.com/solar-thermal-101-flat-plate-solar-collectors/>. [Último acceso: 10 Noviembre 2020].
- [39] R. Dorantes Rodriguez, A. Nila Hernández, J. Tecpa Jiménez y R. Flores Acosta, Construcción de dos calentadores colares con pintura COMEX y con recubrimiento selectivo y resultados preliminares de las pruebas de eficiencia térmica realizados en la UAM-A, Ciudad de Mexico, 2019.
- [40] Pintuco, «Aerocolor Pintura en Aerosol para Altas Temperaturas,» [En línea]. Available: <https://pintuco.com.co/productos/aerocolor-pintura-en-aerosol-para-altas-temperaturas/>. [Último acceso: 29 enero 2020].
- [41] R. Oleum, «High Heat - Alta Temperatura en Aerosol,» [En línea]. Available: <https://www.rustoleumla.com/la/producto/high-heat-alta-temperatura-en-aerosol>. [Último acceso: 5 Febrero 2020].
- [42] pintarmicoche, «Como funciona un spray en pintura?,» [En línea]. Available: <https://www.pintarmicoche.com/como-funciona-un-spray-de-pintura/>. [Último acceso: 10 octubre 2020].
- [43] Homecenter, «Aerosol altas temperaturas,» [En línea]. Available: <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/225430/aerosol-altas-temperaturas-negro-300-mililitros>. [Último acceso: 10 octubre 2020].
- [44] R. Oeum, «Ficha tecnica,» [En línea]. Available: https://s3-us-west-2.amazonaws.com/rustoleumla/product-technical-details/5e74de461864f_tds-high-heat-aerosol.pdf. [Último acceso: 10 octubre 2020].
- [45] Homecenter, «Aerosol especial altas temperaturas,» [En línea]. Available: <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/200297/Aerosol-Especial-Alta-Temperatura-Negro-Brillante-430ml/200297>. [Último acceso: 10 octubre 2020].

- [46] «¿Qué son las pinturas anticalóricas y cuáles son sus usos?,» [En línea]. Available: <https://www.blatem.com/es/actualidad/noticias/que-son-las-pinturas-anticaloricas-y-cuales-son-sus-usos>. [Último acceso: 13 octubre 2020].
- [47] «Radiacion termica,» [En línea]. Available: <http://www.aq.upm.es/Departamentos/Fisica/UD-fisica/RADIACIONweb.doc>. [Último acceso: 09 noviembre 2020].
- [48] J. A. Duffie y W. A. Beckman, Solar Engineering, Wiley, 2013.
- [49] H. H. Palomino, «Propiedades ópticas,» 22 octubre 2015. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/hornapalomino/propiedades-pticas-54242058>. [Último acceso: 2020 Noviembre 9].
- [50] «Reflectancia y transmitancia,» [En línea]. Available: <https://www.studocu.com/co/document/universitat-politecnica-de-catalunya/optica-fisica/lecture-notes/tema-2-reflectancia-y-transmitancia/2394412/view>. [Último acceso: 09 Noviembre 2020].
- [51] ASTM, «Métodos de prueba estándar para la transmitancia y reflectancia de energía solar (terrestre) de materiales laminares,» 2015. [En línea]. Available: <https://la.astm.org/>. [Último acceso: 18 marzo 2020].
- [52] ASTM, «Designation: E 1933 – 99a Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers,» [En línea]. Available: <https://la.astm.org/>. [Último acceso: 15 febrero 2020].
- [53] ASTM, «Designation: D3359, Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape test,» [En línea]. Available: <http://www.astm.org/>. [Último acceso: 12 octubre 2020].
- [54] elcometer, «Cinta adhesiva equivalente al standar astm D3359,» [En línea]. Available: <https://www.elcometer.com/es/elcometer-lanza-una-cinta-adhesiva-equivalente-al-estndar-astm-d3359-para-prueb.html>. [Último acceso: 23 octubre 2020].
- [55] sumatec, «¿Como comporibar la vida util de un metal en una camara salina?,» sumatec, 12 julio 2018. [En línea]. Available: <https://sumatec.co/pruebas-de-corrosion-en-una-camara-salina/>. [Último acceso: 01 noviembre 2020].
- [56] ASTM, «ASTM B117 Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.astm.org/Standards/B117.htm>. [Último acceso: 31 Octubre 2020].

- [57] ISO, «ISO 9227 Corrosion tests in artificial atmospheres — Salt spray tests,» ISO, Marzo 2017. [En línea]. Available: <https://www.iso.org/standard/63543.html>. [Último acceso: 01 Noviembre 2020].
- [58] ASTM, «Designation: ASTM D 610-08 Standard Practice for Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces.,» [En línea]. Available: <http://www.astm.org/>. [Último acceso: 20 febrero 2020].
- [59] «Espectrofotómetros de UV-Visible Thermo Scientific Evolution 220,» 2020. [En línea]. Available: www.thermoscientific.com .
- [60] F. Mesa Claros, Colector solar de placa plana, Bogota: Universidad Nacional.
- [61] I. C. d. N. T. y. C. (ICONTEC), Norma tecnica colombiana NTC 1156: Procedimiento para el ensayo en cámara salina, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. ICONTEC, 2010, 2010.
- [62] L. A. Florez Bedoya y B. Cruz Muñoz, «Fabricación de capas antirreflejantes y absorbedores solares mediante la técnica Sol-gel: Un resumen sobre la variación de síntesis y condiciones experimentales realizadas en la UTP.,» 22 Enero 2020. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.31219/osf.io/m8wxt>. [Último acceso: 20 Noviembre 2020].